

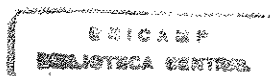
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO SISTEMAS DE PROCESSOS QUÍMICOS E  
INFORMÁTICA

**ASPECTOS OPERACIONAIS E ESTRUTURAIS EM “RETROFIT” DE  
REDES DE TROCADORES DE CALOR**

**Autor: MARCONE LOPES DA SILVA**  
**Orientador: ROGER JOSEF ZEMP**

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de  
Engenharia Química como parte dos requisitos exigidos  
para a obtenção do título de Doutor em Engenharia  
Química

Campinas  
Agosto de 1999



**UNICAMP**  
**BIBLIOTECA CENTRAL**  
**SEÇÃO CIRCULANTE**

76923691

N.º CHAMADA:	
T/	UNICAMP
Si38a	
V.	Ex.
TOMBO BC/ 46767	
PROC. 16.392/0.1	
C	D x
PREÇO R\$ 11,00	
DATA 27/10/01	
N.º CPD	

CM00161022-6

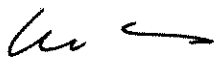
FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Si38a Silva, Marcone Lopes da  
Aspectos operacionais e estruturais em "retrofit" de  
redes de trocadores de calor / Marcone Lopes da Silva.--  
Campinas, SP: [s.n.], 1999.

Orientador: Roger Josef Zemp.  
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Permutadores térmicos. 2. Recuperação do calor.  
3. Calor - Transmissão. I. Zemp, Roger Josef. III.  
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de  
Engenharia Química. III. Título.

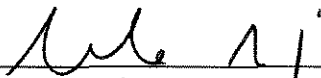
Tese de Doutorado defendida e aprovada em 10 de Agosto de 1999 pela Banca Examinadora constituída pelos Professores Doutores:



Prof. Dr. Roger Josef Zemp



Prof. Dr. Marcelo Cardoso



Prof. Dr. Mauro Antônio da Silva Sá Ravagnani



Profª. Drª. Ana Maria Frattini Fileti



Prof. Dr. Alberto Luiz de Andrade

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL  
SEÇÃO CIRCULANTE

**Este exemplar corresponde à redação final da Tese de Doutorado em Engenharia química defendida por Marcone Lopes da Silva e aprovada pela banca Examinadora em 10 de agosto de 1999.**



---

**Roger Josef Zemp**

**UNICAMP**  
**BIBLIOTECA CENTRAL**  
**SEÇÃO CIRCULANTE**

Aos meus pais, com muito carinho

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Roger pelos momentos de discussões que tivemos, que proporcionou uma orientação bem norteada, além de enriquecer de meus conhecimentos.

Aos colegas e amigos do ambiente de trabalho César, Ricardo, José Vicente, Frede, Edilson (o Conde). Um agradecimento mais caloroso às colegas e amigas Martinha, Lurdinha, Ana Paula, Luciana Santos e Luciana Saliba, por tornarem este ambiente alegre e descontraído, com as brincadeiras e sessões de risos.

Às meninas do suporte à informática, Adréia e Joseane, que sempre se empenharam em resolver os problemas da melhor maneira.

Aos Colegas e amigos das várias “repúblicas” de que participei ao longo destes anos em terra campineira, os quais proporcionaram grandes churrascadas : Cláudio, Neil, Dogrão, Ganhamu, Primário, Macieira, Ribão e Marlus.

Aos Professores e funcionários que de alguma forma colaboraram com o desenvolvimento deste trabalho

Ao Apoio financeiro fornecido do órgão de fomento CAPES sem o qual tornaria difícil a realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

<b>Capítulo 1 -INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. <i>Processos Químicos e Integração Energética .....</i>	<i>1</i>
1.2. <i>Retrofit de Redes de Trocadores de Calor.....</i>	<i>2</i>
1.3. <i>Aspectos Operacionais em Retrofit de Redes de Trocadores.....</i>	<i>4</i>
1.4. <i>Limitações de Queda de Pressão e Distribuição de Área em Retrofit.....</i>	<i>5</i>
<b>Capítulo 2 - RETROFIT DE REDES DE TROCADORES DE CALOR – MÉTODOS TRADICIONAIS.....</b>	<b>7</b>
2.1 <i>Introdução.....</i>	<i>7</i>
2.2 <i>Linha de Desenvolvimento – Matemática ou Termodinâmica? .....</i>	<i>7</i>
2.3 <i>Considerações e Simplificação.....</i>	<i>9</i>
2.4 <i>Princípios de Integração de Energia e Estrangulamento Energético em Processos Químicos.....</i>	<i>9</i>
2.4.1 <i>Curvas compostas e balanço energético entre correntes .....</i>	<i>10</i>
2.4.2 <i><math>\Delta T_{min}</math> e o conceito de pinch .....</i>	<i>14</i>
2.5 <i>Conceito de Transferência de Calor Vertical .....</i>	<i>14</i>
2.6 <i>Relações Entre Área e Energia.....</i>	<i>16</i>
2.6.1 <i>Projetos novos e modificações em redes de trocadores de calor .....</i>	<i>18</i>
2.7 <i>Conclusões Preliminares .....</i>	<i>19</i>
<b>Capítulo 3 - RETROFIT DE REDES DE TROCADORES DE CALOR – MÉTODOS TRADICIONAIS.....</b>	<b>21</b>
3.1. <i>Introdução.....</i>	<i>21</i>
3.2. <i>Análise Retrofit por Inspeção .....</i>	<i>21</i>
3.3. <i>Métodos Matemáticos de Otimização .....</i>	<i>24</i>
3.4. <i>Métodos Termodinâmicos.....</i>	<i>24</i>
3.4.1 <i>Análise energética tradicional .....</i>	<i>25</i>
3.1.2 <i>Considerações estruturais – Metodologia da matriz de área.....</i>	<i>29</i>
3.1.3 <i>Ferramentas de projeto.....</i>	<i>33</i>
3.5. <i>Discussão.....</i>	<i>34</i>

<b>Capítulo 4 - Queda de Pressão e suas Implicações em Análise Energética.....</b>	<b>35</b>
4.1 <i>Análise de processos existentes.....</i>	35
4.1.1 <i>Avaliação térmica da rede existente.....</i>	36
4.1.2 <i>Estimativa de área.....</i>	37
4.2 <i>Relações entre <math>\Delta P</math> e a Área de Troca Térmica.....</i>	37
<b>Capítulo 5 - MATRIZ DE ÁREA COM LIMITAÇÕES DE QUEDA DE PRESSÃO – UMA NOVA ABORDAGEM.....</b>	<b>41</b>
5.1 <i>Introdução.....</i>	41
5.2 <i>Disponibilidade de queda de pressão em processos.....</i>	41
5.3 <i>Considerações a respeito de modelos não lineares.....</i>	43
5.4 <i>Matriz de área original com as equações de queda de pressão – E possível? .....</i>	45
5.4.1 <i>Implicações da modelagem sugerida .....</i>	46
5.5 <i>Modelo da matriz de área modificado.....</i>	46
5.5.1 <i>Spaghetti Network e suas Implicações .....</i>	47
5.5.2 <i>Algoritmo da matriz de área modificado.....</i>	49
5.5.3 <i>Equações do modelo.....</i>	50
5.6 <i>Considerações de projeto de redes com queda de pressão.....</i>	54
5.7 <i>Exemplo de aplicação.....</i>	55
5.7.1 <i>Estimativa de área.....</i>	56
5.7.2 <i>Análise dos trocadores existentes e reposicionamento .....</i>	58
5.7.3 <i>Alocação de novos trocadores.....</i>	65
5.7.4 <i>Correção dos coeficientes para satisfazer as restrições de queda de pressão.....</i>	68
5.8 <i>Extensibilidade do modelo desenvolvido.....</i>	69
5.9 <i>Discussão.....</i>	70
<b>Capítulo 6 - ESTUDO DE CASOS.....</b>	<b>71</b>
6.1 <i>Análise econômica para a redução do consumo de energia.....</i>	71
6.1.1 <i>Análise térmica da rede existente.....</i>	74
6.1.2 <i>Avaliação econômica .....</i>	74
6.1.3 <i>Estimativa de área adicional e coeficientes convectivos.....</i>	78
6.1.4 <i>Análise dos trocadores existentes e reposicionamento .....</i>	79



6.2. <i>Análise de flexibilidade</i> .....	88
6.2.1 <i>Avaliação econômica</i> .....	90
6.2.2 <i>Estimativa de área</i> .....	92
6.3. <i>Discussão</i> .....	93
<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>95</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>97</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> - Gráfico Entalpia <i>versus</i> Temperatura para duas correntes .....	10
<b>Figura 2.2</b> - Construção da curva composta quente para duas correntes .....	11
<b>Figura 2.3</b> - Construção da curva composta fria para duas correntes .....	12
<b>Figura 2.4</b> - Diagrama <b>Entalpia <i>versus</i> temperatura</b> para as correntes, quentes e frias .....	13
<b>Figura 2.5</b> - Diagrama TxE para dois $\Delta T_{min}$ diferentes, mostrando que a diferença entre os consumos de utilidades permanecem constante .....	13
<b>Figura 2.6</b> - Transferência de calor vertical entre as correntes de um processo .....	15
<b>Figura 2.7</b> - Relação entre o $\Delta T_{min}$ e os requerimentos de área e energia .....	17
<b>Figura 2.8</b> - Relação entre área e energia em integração .....	17
<b>Figura 2.9</b> - Relação entre custo e consumo de energia .....	18
<b>Figura 3.1</b> - Rede de trocadores para ilustrar o método de inspeção .....	22
<b>Figura 3.2</b> - Estratégia de <i>Retrofit</i> por inspeção .....	23
<b>Figura 3.3</b> - Localização de um processo em relação a o projeto com área mínima .....	26
<b>Figura 3.4</b> - Estratégias de <i>retrofit</i> pelo método Alpha .....	27
<b>Figura 3.5</b> - Região de <i>retrofit</i> pelo método Alpha .....	28
<b>Figura 3.6</b> - Relação entre o tempo de retorno e o investimento necessário em uma rede .....	29
<b>Figura 3.7</b> - Estrutura <i>spaghetti network</i> .....	31
<b>Figura 3.8</b> - Comparação entre a estrutura <i>spaghetti</i> e uma rede existente .....	31
<b>Figura 3.9</b> - Flexibilidade da estrutura <i>spaghetti network</i> .....	32
<b>Figura 3.10</b> - Construção do <i>DFP</i> a partir das curvas compostas .....	34
<b>Figura 4.1</b> - Rede para o caso de cinco correntes .....	35
<b>Figura 5.1</b> - Gráfico de uma curva de bomba .....	43
<b>Figura 5.2</b> - Esquemas de estrutura <i>spaghetti network</i> modificada em série para estimativa de área .....	48
<b>Figura 5.3</b> - Esquemas de estrutura <i>spaghetti network</i> modificada em paralelo para estimativa de área .....	49
<b>Figura 5.4</b> - Esquema de otimização .....	50
<b>Figura 5.5</b> - Diagramas das forças motrizes para os trocadores existentes .....	59
<b>Figura 5.6</b> - Diagrama das forças motrizes para o trocador 1 .....	62

<b>Figura 5.7</b> - Diagrama das forças motrizes para o trocador 3 .....	64
<b>Figura 5.8</b> - Rede após a realocação dos trocadores .....	65
<b>Figura 5.9</b> – Correntes que devem ser satisfeitas na etapa de alocação de nova área .....	66
<b>Figura 5.10</b> - Rede Modificada .....	67
<b>Figura 5.11</b> - Possíveis aplicações do modelo desenvolvido .....	69
<b>Figura 6.1</b> - Rede da planta de aromático apresentada em TJOE (1986) .....	72
<b>Figura 6.2</b> - Curva de <i>retrofit</i> para o caso de eliminação de gargalos .....	76
<b>Figura 6.3</b> - Variação do coeficiente convectivo da corrente <b>F1</b> em função do $\Delta T_{min}$ .....	78
<b>Figura 6.4</b> - Diagrama das forças motrizes para os trocadores existentes .....	80
<b>Figura 6.5</b> - Diagrama das forças motrizes para o trocador 1 .....	82
<b>Figura 6.6</b> - Diagrama das forças motrizes para o trocador 3 .....	83
<b>Figura 6.7</b> - Diagrama das forças motrizes para o trocador 4 .....	84
<b>Figura 6.8</b> - Rede após o reposicionamento dos trocadores .....	85
<b>Figura 6.9</b> - Rede modificada após a alocação de novos trocadores .....	87
<b>Figura 6.10</b> - Rede de trocadores para os dois casos base .....	89
<b>Figura 6.11</b> - Curva de <i>retrofit</i> para os dois casos bases .....	91

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 4.1</b> – Dados das correntes para o caso de cinco correntes .....	36
<b>Tabela 4.2</b> – Dados dos trocadores para o caso de cinco correntes .....	36
<b>Tabela 4.3</b> – Área adicional entre as correntes (Coef. Assumidos) .....	37
<b>Tabela 5.1</b> – Propriedades físicas das correntes .....	56
<b>Tabela 5.2</b> – Área adicional entre as correntes .....	57
<b>Tabela 5.3</b> – Coeficientes e velocidades calculados .....	57
<b>Tabela 5.4</b> – Distribuição de carga térmica (Trocadores existentes) .....	60
<b>Tabela 5.5</b> – Distribuição de carga térmica (Trocadores novos) .....	61
<b>Tabela 5.6</b> – Eficiência da carga térmica alocada .....	61
<b>Tabela 5.7</b> – Condição operacional dos novos trocadores alocados na rede .....	68
<b>Tabela 5.8</b> – Projeto dos novos trocadores .....	69
<b>Tabela 6.1</b> – Dados das correntes para o estudo de análise econômica .....	72
<b>Tabela 6.2</b> – Dados dos trocadores .....	73
<b>Tabela 6.3</b> – Propriedades físicas das correntes .....	74
<b>Tabela 6.4</b> – Área vertical adicional .....	79
<b>Tabela 6.5</b> – Coeficientes e velocidades calculados .....	79
<b>Tabela 6.6</b> – Distribuição de carga térmica (Trocadores existentes) .....	81
<b>Tabela 6.7</b> – Distribuição de carga térmica (Trocadores novos) .....	86
<b>Tabela 6.8</b> – Dados dos novos trocadores alocados .....	87
<b>Tabela 6.9</b> – Dados das correntes para os dois casos base .....	89
<b>Tabela 6.10</b> – Dados dos trocadores necessários à operação dos casos base .....	90
<b>Tabela 6.11</b> – Propriedades físicas das correntes .....	90
<b>Tabela 6.12</b> – Área vertical adicional para os dois casos base .....	92
<b>Tabela 6.13</b> – Coeficientes convectivos para os dois casos base .....	93

## NOMENCLATURA

$A$	- Área de troca térmica [ $\text{m}^2$ ]
$C_i$	- Custo de investimento [US\$]
$c_p$	- Calor específico [ $\text{J/kg } ^\circ\text{C}$ ]
$D_{it}$	- Diâmetro interno do tubo [mm]
$D_{et}$	- Diâmetro externo do tubo [mm]
$D_{eq}$	- Diâmetro equivalente [mm]
$E_{et}$	- Espaçamento entre os tubos [mm]
$h$	- Coeficiente convectivo de transferência de calor [ $\text{kW/m}^2 ^\circ\text{C}$ ]
$K_{p1}$	- Constante de proporcionalidade para a equação 4.1
$K_{p2}$	- Constante de proporcionalidade para a equação 4.2
$K_{p3}$	- Constante de proporcionalidade para a equação 4.3
$K_{p4}$	- Constante de proporcionalidade para a equação 4.4
$K_v$	- Constante de proporcionalidade para a equações de velocidade 5.9 e 5.12
$M$	- Fluxo mássico [ $\text{kg/m}^3$ ]
$Pr$	- Número de Prandtl [adimensional]
$Q$	- Carga térmica [kW]
$R_c$	- Retorno de capital [US\$/Ano]
$T$	- Temperatura [ $^\circ\text{C}$ ]
$T_{ent}$	- Temperatura de entrada da corrente [ $^\circ\text{C}$ ]
$T_{sai}$	- Temperatura de saída da corrente [ $^\circ\text{C}$ ]
$V$	- Velocidade [m/s]
$V_0$	- Fluxo volumétrico [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]
$Wc_p$	- Capacidade térmica [ $\text{kW}/^\circ\text{C}$ ]
$\Delta H$	- Entalpia da corrente [kW]
$\Delta P$	- Queda de pressão disponível na corrente
$\Delta P_t$	- Queda de pressão no tubo [Pa]
$\Delta P_c$	- Queda de pressão no casco [Pa]

$\Delta T_{LM}$	- Média logarítmica de temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\Delta T_{min}$	- Mínima diferença de temperatura permitida nos terminas do trocador [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\alpha$	- Eficiência de área [adimensional]
$\kappa$	- Condutividade térmica [ $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ ]
$\mu$	- Viscosidade [ $\text{N.s}/\text{m}^2$ ]
$\rho$	- Densidade [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

#### Subscritos

<i>min</i>	- Mínimo
<i>max</i>	- Máximo
<i>i</i>	- Corrente quente
<i>j</i>	- Corrente fria
<i>n,k</i>	- intervalo de entalpia
<i>s</i>	- Corrente ou quente ou fria
<i>ex</i>	- Dado da rede de trocadores de calor existente (área ou carga térmica)
<i>v</i>	- Referente a área vertical

#### Superescritos

<i>n</i>	- Expoente da equação 4.1
<i>m</i>	- Expoente da equação 4.3
<i>ex</i>	- Existente
<i>nov</i>	- Novo
<i>pos</i>	- Positivo

## RESUMO

A integração energética de processos é um dos ramo da engenharia química que ganhou grande relevância nos últimos 25 anos, em função da necessidade de se economizar energia nos processos industriais, além de reduzir a emissão de poluentes ao meio ambiente. Esta integração, ocorre através do aproveitamento de energia entre as correntes do processo, levando a síntese de redes de trocadores de calor, para processos novos, ou a modificação de redes existentes que operam de modo ineficiente.

Inicialmente, a maior atenção foi dada ao desenvolvimento redes de trocadores de calor, com um elevado número de trabalhos presentes na literatura, os quais propunham metodologias de projeto de redes. No entanto, pouca atenção foi dada aos processos existentes. Somente em meados dos anos 80 surgiu a primeira publicação sobre a modificação de redes de trocadores de calor, *retrofit*.

O *Retrofit* de redes consiste no aumento do nível de recuperação de energia em um processo, através da realocação dos trocadores existentes e aumento da área de troca térmica, por meio da alocação de novos trocadores. Entretanto, dois fatores principais são desconsiderados em metodologias estudadas: a distribuição da área de troca térmica da rede existente e a queda de pressão nas correntes. Sem a consideração de queda de pressão das correntes o projeto pode tornar-se inviável, uma vez que serão alocados novos trocadores sem a preocupação com o aumento de queda de pressão que estes trarão a rede.

Desta forma, neste trabalho é apresentada uma metodologia de retrofit, buscando-se uma análise energética mais realista em redes existentes. Esta difere de outras metodologias, por considerar a distribuição de área alocada entre as correntes, através da representação da rede na forma de matriz de área e as limitações de queda de pressão em cada corrente, levando ao desenvolvimento de um modelo não linear. Este modelo permite a obtenção de estimativas de custos do processo mais próxima dos custos reais de projeto, ponto fundamental na proposta de uma metodologia desta natureza.

A metodologia foi demonstrada para um caso presente na literatura, apresentando grande concordância entre a pré-análise e o projeto detalhado da rede. Outras situações usualmente estudadas em retrofit também foram abordadas com esta nova metodologia: análise de flexibilidade de redes, eliminação de gargalos energéticos em processos e análise econômica.

**Palavras chave:** Pemitadores Térmicos, Recuperação do Calor e Calor-Transmissão

## ABSTRACT

The study of retrofit procedures for heat exchanger networks has been subject of numerous research work, due to its importance in energy-saving policies in chemical processes. Early work focussed on the cost (and area) estimation of the additional exchangers required to achieve the new process conditions, without considering the layout of the existing network. Later work moved to a more detailed analysis of the existing networks, and the retrofit procedure was extended to consider the actual layout of the existing exchangers. The main drawback of these methods is that they are restricted to constant heat transfer coefficients, and do not take into account the available pressure drop for new exchangers.

In this work, a new procedure for heat exchanger network retrofit is proposed. The procedure takes into account the existing exchanger network and the maximum additional pressure drop allowed for each stream. The new procedure is based on the simultaneous minimization of the additional area, constrained to the available pressure drop and existing exchangers. The network is modeled as a sequence of subnetworks, similar to the traditional 'spaghetti network'. The spaghetti network is extended to include both the existing exchangers and the new exchangers, and described as a nonlinear programming problem, where the object function is the additional area (and cost), subject to the maximum pressure drop available for each stream.

Solving the NLP problem gives the required area for retrofit (and cost), and the optimized film coefficients for the heat exchanger design. The procedure can be repeated for different values of the heat recovery, thus allowing for the identification of the best retrofit scenario.

The application of the proposed procedure to a number of case studies showed that the methodology is capable of correctly targeting retrofit options ahead of design, and more specifically:

- The final area required for the retrofit (designed heat exchanger network) is very close to the area calculated at the targeting stage;
  - The final network pressure drop fall do not exceed the available pressure drop;
  - The detailed exchanger design leads to exchangers with film coefficient and pressure close to the one predicted at the targeting stage;
- thus allowing for the pressure drop restrictions to be properly considered in a retrofit project.



## Capítulo 1 - INTRODUÇÃO

Nesta tese, discorre-se sobre a integração energética de processos, com ênfase na modificação de processos existentes. Neste estudo, serão considerados os aspectos térmicos, operacionais e estruturais de processos químicos industriais, visando a otimização energética destes. Neste capítulo, será feita uma breve introdução ao assunto, sendo que um estudo mais aprofundado será realizado ao longo deste trabalho. Também serão abordadas as motivações que conduzem a este estudo, bem como quais rumos devem ser seguidos, a fim de que seja proposta uma metodologia que apresente uma abordagem mais realista e eficaz na otimização energética de processos químicos industriais.

### **1.1. Processos Químicos e Integração Energética**

A grande maioria dos processos químicos industriais consomem e rejeitam grandes quantidades de energia. Antes da crise mundial de energia, no início dos anos 70, não havia a preocupação da utilização eficiente de energia em processos industriais. O petróleo, principal fonte de energia, era barato e os custos relacionados ao consumo de energia não provocavam impacto significativo nos custos globais do processo, sendo portanto desconsiderados em análises econômicas. Entretanto, devido a escassez de petróleo, gerada pela crise mundial, seu preço aumentou consideravelmente, elevando os custos de energia em processo químicos, que passou a ser significativo em análise econômica.

A elevação dos custos globais dos processos industriais, por consequência do aumento do preço do petróleo, criou necessidade de estudos que levassem à redução do consumo de energia em processos químicos. Estes estudos tinham por finalidade aumentar a integração de calor entre as correntes de processos químicos, com a geração de redes de trocadores de calor com elevados níveis de recuperação de energia. Esta linha de pesquisa mais tarde denominou-se **integração energética de processos**.

Nos processos químicos, existem correntes que necessitam do fornecimento de calor, ou seja, precisam ser aquecidas, enquanto outras requerem a retirada de calor, isto é, necessitam de resfriamento. O princípio básico da integração energética é maximizar a troca de calor as entre correntes, utilizando as correntes que necessitam de resfriamento como fornecedoras de calor e as correntes que requerem aquecimento como consumidoras de calor. Esta “integração” pode ser realizada através da confecção de uma rede de trocadores de calor entre as correntes do processo.

## 2 Introdução

Só após a alocação de trocadores entre as correntes é que seriam consumidas correntes de utilidades, quentes ou frias, para o suprimento de correntes que não foram satisfeitas, reduzindo assim o consumo de energia na rede. Este princípio já era aplicado antes da crise mundial de energia, com a alocação dos trocadores sendo realizada através dos conhecimentos do engenheiro de projeto, baseada portanto na intuição do engenheiro. No entanto, havia a necessidade do desenvolvimento de técnicas eficazes que guiassem a alocação dos trocadores.

O desenvolvimento redes de trocadores de calor entre as correntes de processo, utilizando princípios de integração energética, tem como objetivo fundamental da síntese de redes é a geração de uma rede de trocadores de calor que apresente um custo mínimo global. Para tanto, deve-se levar em consideração a relação entre área dos trocadores e o quanto de calor será recuperado pela rede. O problema proposto parece simples, mas a complicação reside no fato que a geração de uma rede de trocadores de calor entre correntes de um processo é um problema de natureza combinatorial. Quanto maior o número de correntes maior a quantidade de possibilidades de combinação entre estas, e portanto maior o número de possíveis redes de podem ser geradas. No entanto, algumas destas redes podem ser inviáveis economicamente, requerendo um elevado custo em sua confecção para uma economia pouco significativa no consumo de energia.

Os estudos voltados para o desenvolvimento de novas redes de trocadores de calor é um ramo da integração energética bastante estudado na literatura, estando bem compreendida e desenvolvida, e tem grande importância no estudo da modificação de redes de trocadores de calor existentes, conhecida como *retrofit*, pois muitos dos métodos de *retrofit* derivaram ou basearam-se em princípios fundamentais de métodos de desenvolvidos para processos novos.

### 1.2. *Retrofit de Redes de Trocadores de Calor*

Os primeiros estudos de integração energética, foram voltados à síntese de redes de trocadores de calor em novas plantas. Entretanto, os processos químicos industriais que foram projetados antes da crise de energia operavam com redes com baixa eficiência. Estes processos necessitavam melhorar seu desempenho energético, mas devido ao pouco conhecimento da área, a rede de trocadores de calor existente representava um fator que dificultava ainda mais um problema que já guardava elevada complexidade. Somente em meados dos anos 80 é que as modificações em redes existentes começaram a ser estudadas de maneira sistemática.

O *retrofit* de redes de trocadores de calor consiste em uma modificação na estrutura do processo, por meio da realocação dos trocadores presentes na rede e do aumento da área de troca térmica da rede, com a alocação de novos trocadores, elevando os níveis de recuperação de energia a um patamar economicamente viável.

A utilização de *retrofit* de redes também pode ser aplicada para:

- redução de custos do processo, através do aumento da recuperação de energia;
- remover dificuldades operacionais em redes de trocadores de calor, decorrentes do aumento dos fluxos das correntes dos processos;
- disponibilizar a flexibilidade em redes, com o objetivo de operar em mais de uma condição operacional, fazer novos produtos ou processar novas alimentações.

Estas duas aplicações de estudos de melhoria de desempenho energético para tornar operacional o processos industriais, são bastante abordadas na literatura de *retrofit* e serão estudadas em maiores detalhes.

Mesmo com poucos anos de pesquisa, muitos trabalhos já foram realizados em *retrofit* redes, existindo métodos que apresentam procedimentos sistemáticos para a modificação de redes existentes. Atualmente, duas linhas de pesquisa estudam o assunto, uma baseadas em métodos termodinâmicos e outra baseada em métodos matemáticos. Tanto métodos matemáticos como termodinâmicos podem utilizar a mesma sistemática na abordagem do problema:

- estimativa de custos realizada antes do projeto da rede, através de estimativa de área e do consumo de energia;
- confecção da malha de troca térmica, isto é, como os trocadores estarão dispostos na rede, além da área de troca térmica da cada trocador.

O ponto crucial do estudo de integração energética é que a estimativa de custos seja suficientemente confiável, isto é, estabelecido o nível de recuperação de energia desejável, a estimativa de área deve ser próxima dos cálculos de área dos trocadores, realizados na confecção da rede. Os métodos presentes na literatura apresentam grande compatibilidade entre estas duas etapas, mas além disto o projeto final da rede, ou seja, o projeto detalhado dos equipamentos, também deve se compatível com os cálculos anteriores. No entanto, com a utilização dos métodos tradicionais, presentes na literatura, não há garantias que esta compatibilidade exista, pois os aspectos operacionais não são considerados no estudo de análise energética tradicional. Estes serão fundamentais no cálculo dos equipamentos, não podendo ser totalmente desprezados.

### 1.3. Aspectos Operacionais em Retrofit de Redes de Trocadores

Como foi citado, muito já foi realizado em *retrofit* de redes, e os métodos existentes que abordam os problemas de *retrofit* de redes utilizam procedimentos sistemáticos bem desenvolvidos e consistentes. Então, naturalmente surgiria a pergunta: Por que estudar *retrofit* de redes, se os métodos existentes já abordam o problema de modo sistemático e apresentam resultados eficientes?

Os procedimentos de *retrofit* existentes sempre enfocaram a necessidade de que a estimativa de custos que fosse concordante com os custos calculados para os trocadores presentes na rede confeccionada. A maioria dos métodos existentes na literatura satisfazem este requisito, pois em um estudo de análise energética é preciso que os custos estimados sejam condizentes com os custos de projeto, sob pena de uma análise inviável. No entanto, é observado na literatura, que quando estes custos estimados são comparados com os custos dos equipamentos projetados na etapa de projeto detalhado pode haver discrepância da ordem de 100%, deixando a análise energética, realizada inicialmente, sem nenhuma validade. Houve então, a necessidade de uma avaliação mais criteriosa, para que fossem estudadas quais as causas de tal discrepância.

Um estudo de grande relevância realizado por PANJEH-SHAHI (1992), mostrou que as técnicas existentes até então, para a síntese, assumiam coeficientes convectivos para as correntes, enquanto na fase de projeto detalhado estes coeficientes são calculados a partir da queda de pressão disponível para a corrente, causando uma inconsistência entre a área estimada na síntese da rede e a área calculada no projeto detalhado.

Nos projetos de *retrofit*, ocorre o mesmo tipo de problema, sendo ressaltado por PANJEH-SHAHI (1992) que nestes projetos só há a preocupação com aspectos térmicos da rede, sendo deixado à parte se há disponibilidade de queda de pressão para que seja realizada o *retrofit* da rede. E mesmo que exista esta disponibilidade ela não será respeitada, uma vez que geralmente se assumem os coeficientes já existentes na rede para a estimativa de área, sendo que estes certamente serão diferentes daqueles calculados no projeto dos equipamentos.

Portanto, os métodos de *retrofit* tradicional não consideram a disponibilidade de queda de pressão das correntes, sendo que a alocação de nova área requer a disponibilidade de queda de pressão na rede. Mesmo o trabalho de PANJEH-SHAHI (1992), que aborda o assunto, não considera que as correntes têm disponibilidade de queda de pressão. No entanto, ele considera que os trocadores existentes em uma rede podem estar fazendo uso ineficiente da queda de

pressão, e através de, por exemplo, a troca do lado em que os fluidos passam é possível melhorar a eficiência de queda de pressão do trocador.

#### **1.4. Limitações de Queda de Pressão e Distribuição de Área em Retrofit**

A consideração da disponibilidade da queda de pressão nas correntes de um processo é de importância fundamental no estudo de *retrofit*. No estudo de PANJEH-SHAHI (1992), é notório o fato de que se não for possível disponibilizar queda de pressão nas correntes não será possível a realização do *retrofit* da rede.

O estudo realizado por PANJEH-SHAHI (1992) não trata problemas com disponibilidade de queda de pressão, mas como este necessita disponibilizar queda de pressão, se esta já estiver disponível será possível realizar o *retrofit*. No entanto, seu trabalho baseia-se em um dos trabalhos pioneiros em *retrofit* de redes, realizado por TJOE (1986), o qual não considera a distribuição de área da rede existente, considerando apenas a área global de troca térmica. Em um outro trabalho presente na literatura, realizado por SHOKOYA (1992), mostra-se que é possível considerar a distribuição da área de troca térmica da rede existente na etapa de estimativa de custos. Este trabalho foi de grande utilidade nesta tese, pois é a única referência na literatura que utiliza a distribuição de área para uma análise energética mais precisa, obviamente quando comparada com a metodologia de TJOE (1986).

No presente trabalho, buscou-se o desenvolvimento de uma metodologia de *retrofit* que concilia-se as limitações de queda de pressão das correntes com a distribuição da área de troca térmica dos trocadores existentes, de modo a fazer uma análise energética mais precisa. É necessário enfatizar que ambas considerações deveriam estar presentes na etapa de estimativa de custos, e aqui surge a diferença fundamental entre este trabalho e o proposto por PANJEH-SHAHI (1992). No trabalho de PANJEH-SHAHI (1992), não é possível a realização de uma estimativa de custos, fundamental em qualquer análise energética.

Portanto, este trabalho baseia-se fundamentalmente, na proposta de PANJEH-SHAHI (1992) que só é possível a realização do *retrofit* da rede se houver queda de pressão disponível nas correntes, pois sem essa não é possível a alocação de área na rede, e na proposta de SHOKOYA (1992) que a distribuição de área da rede existente deve ser considerada para o sucesso da análise energética.

## **Capítulo 2 - RETROFIT DE REDES DE TROCADORES DE CALOR – MÉTODOS TRADICIONAIS**

### **2.1 Introdução**

Os estudos em integração energética, inicialmente, concentraram-se no desenvolvimento de redes de trocadores de calor, onde os principais fundamentos de análise energética foram aplicados para a confecção destas redes em processos novos. Mais tarde, estes fundamentos serviram de base para o desenvolvimento de metodologias que abordavam modificações em redes existentes, *retrofit*, com o intuito de melhorar a eficiência de processos que apresentavam baixos níveis de recuperação de energia. Estes princípios são melhor compreendidos quando aplicados em novos processos; uma vez entendida a sua aplicação torna-se mais clara a utilização destas técnicas em modificações de processos existentes.

Neste capítulo, os princípios de integração de energia serão apresentados, enfocando principalmente sua aplicação no desenvolvimento de redes de trocadores para processos novos, onde serão abordados os cálculos de consumo mínimo de energia em processos e a estimativa de área para a rede de trocadores de calor.

### **2.2 Linha de Desenvolvimento – Matemática ou Termodinâmica?**

Os estudos de integração energética apresentam uma vasta literatura, onde a grande maioria dos trabalhos concentram-se em duas linhas de pesquisa principais:

- uma baseada em otimização matemática;
- outra baseada em princípios termodinâmicos.

Esta última, utiliza os conceitos da Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica como base para a análise energética, tanto para os casos de processos novos, como em situações de *retrofit*. Nesta técnica aplica-se uma estratégia seqüencial, sendo realizado um acompanhamento passo a passo da aplicação da análise energética na resolução do problema, com a interferência do projetista. A análise *pinch* é o principal método citado da literatura que utiliza princípios termodinâmicos, sendo sua principal referência o trabalho de LINNHOFF e HINDMARSH (1983).

formulado, não sendo possível interferir na sua solução, a menos que haja uma mudança de formulação.

A formulação de modelos matemáticos de otimização, aplicadas ao desenvolvimento de processos novos, deriva-se de técnicas oriundas da pesquisa operacional e teve no trabalho de PAPOULIAS e GROSSMANN (1983) uma das primeiras grandes contribuições da área. Eles desenvolveram o modelo de transbordo (*trasshipment model*), o qual utilizava programação linear (*Linear Programming - LP*) para a estimativa do consumo de energia. Em seguida, através do desenvolvimento de um modelo programação linear inteira mista (*Mixed Integer Linear Programming - MILP*), podia-se calcular o número mínimo de trocadores alocado entre as correntes. Após este trabalho outros apareceram na literatura, sendo desenvolvidos modelos matemáticos que utilizavam programação não linear (*Non Linear Programming - NLP*) para a estimativa de custos, como a importante publicação de FLOUDAS ET ALI (1986). Já outros modelos baseavam-se em programação não linear inteira mista (*Mixed Integer Non Linear Programming - MINLP*) para a síntese ótima da rede. Estes trabalhos são essencialmente acadêmicos, pois modelos para a síntese de rede são relativamente complexos, tanto em sua formulação como em sua implementação, necessitando de um tempo relativamente longo para a sua formulação. Já a análise *pinch*, por sua simplicidade de aplicação, apresenta uma grande quantidade de aplicações industriais.

Os métodos de otimização, apesar de apresentar dificuldades de formulação e implementação, tem a vantagem de ser possível incluir restrições características de determinados problemas, como por exemplo evitar troca de calor entre duas correntes. Estes ainda apresentam a vantagem de garantir de resultados ótimos, quando os problemas de otimização considerados não são convexos. No entanto, apresentam a desvantagem de consumir grande quantidade de tempo computacional na resolução de problemas industriais de grande dimensão, bem como de nem sempre chegar ao ótimo global, ficando em um ótimo local, no caso de problemas com função objetivo ou restrições não convexas. Já a análise *pinch*, tem a vantagem de poder tratar problemas de dimensão industrial sem dificuldades, mas apresenta problemas quando características intrínsecas devem ser consideradas, como a proibição de troca de calor entre duas correntes, além da não garantia de resultados ótimos.

Portanto, a definição de que linha de pesquisa é mais adequada depende do tipo de problema abordado, uma vez que ambas apresentam vantagens e limitações. Como no presente

trabalho buscou-se o desenvolvimento de uma metodologia geral, que não estivesse amarrada a determinadas restrições específicas de certos problemas, optou-se por trabalhar com a análise *pinch*, além de ser pretendido que a metodologia desenvolvida pudesse ser aplicada a problemas industriais, sem que houvesse a limitação de fatores como o tempo computacional.

### 2.3 Considerações e Simplificação

Na análise energética tradicional, utilizando a análise *pinch*, realiza-se uma avaliação puramente térmica do processo, desprezando-se limitações operacionais que tornariam o problema mais complexo. Isto porque, um dos aspectos principais da análise *pinch* é que sua aplicação seja a mais simples possível, não requerendo a utilização de recursos computacionais, e portanto podendo-se efetuar todos os cálculos manualmente. Nesta análise, para a simplificação do problema considera-se que os coeficientes convectivos de transferência de calor são dados do problema e independem da velocidade de escoamento dos fluidos. Como será visto, esta consideração eliminará a necessidade da aplicação de recursos computacionais.

Os dados necessários para a realização de uma análise energética tradicional são:

- temperatura das correntes;
- capacidade térmica das correntes;
- coeficientes convectivos das correntes;
- utilidades disponíveis;
- equações de custo de área de troca térmica e utilidades.

O objetivo primordial da análise energética é a estimativa de área e consumo de energia antes da síntese da rede, sendo necessário que esta estimativa seja condizente com o projeto final da rede. Portanto, apenas com os dados acima, utilizando a análise *pinch*, o projetista pode determinar consumo mínimo de utilidades, área mínima e os custos envolvidos no projeto da rede, antes que a rede de trocadores de calor seja projetada.

### 2.4 Princípios de Integração de Energia e Estrangulamento Energético em Processos Químicos

A análise *pinch* baseia-se no estudo de fluxo de calor entre correntes de processos químicos, através de balanço energético entre correntes e limitações decorrentes da Segunda Lei da Termodinâmica. A partir destes princípios pode-se observar a existência de regiões críticas na rede que será projetada, onde as trocas de calor entre as correntes são mais restritas. Estas regiões



são conhecidas como regiões de estrangulamento energético. Para uma melhor compreensão destas regiões e sua importância na análise do fluxo de calor entre as correntes, o conhecimento das curvas compostas do processo é fundamental.

#### 2.4.1 Curvas compostas e balanço energético entre correntes

Numa situação hipotética de um processo em que duas correntes devem trocar calor, se estiver previamente estabelecida uma mínima diferença de temperatura entre elas e o sentido do escoamento dos fluidos em contra-corrente, é possível calcular a quantidade de calor trocado entre as correntes, bem como o consumo de utilidades necessário. Para isto, basta representar ambas as correntes em um diagrama **Temperatura versus Entalpia (TxE)**, como apresentado na figura 2.1.

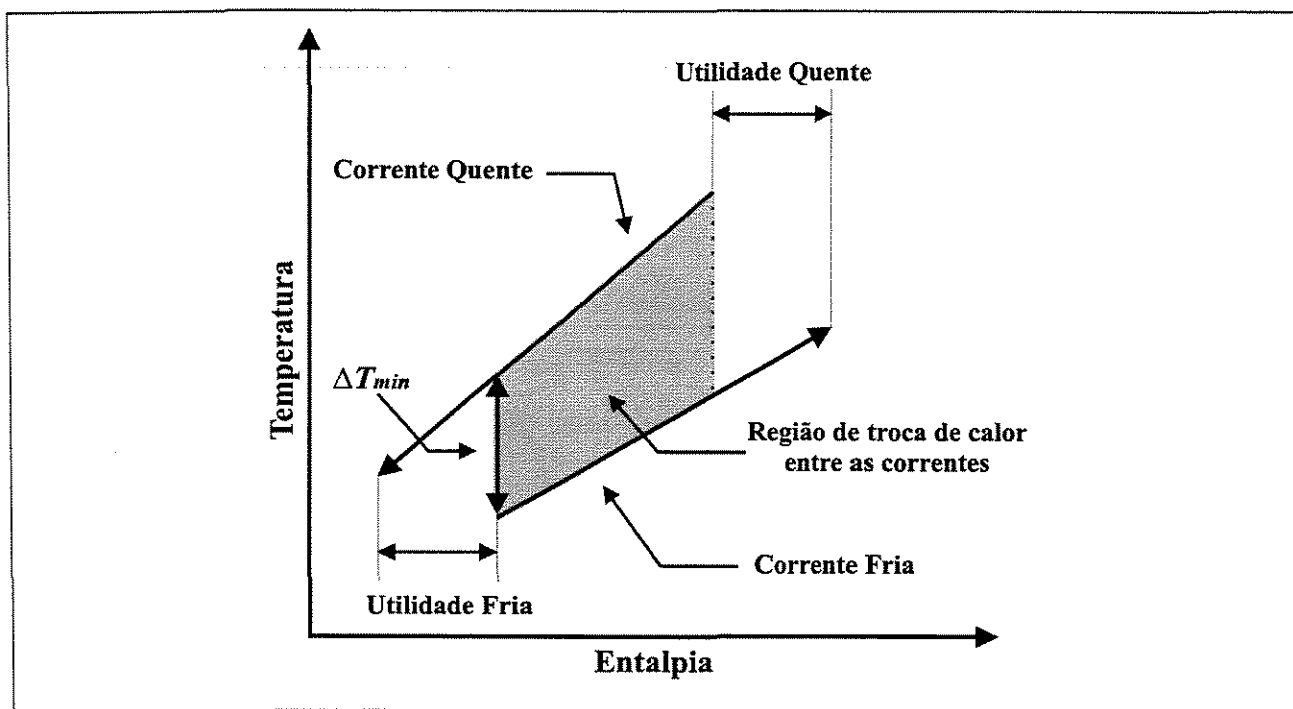


Figura 2.1 – Gráfico Temperatura versus Entalpia para duas correntes

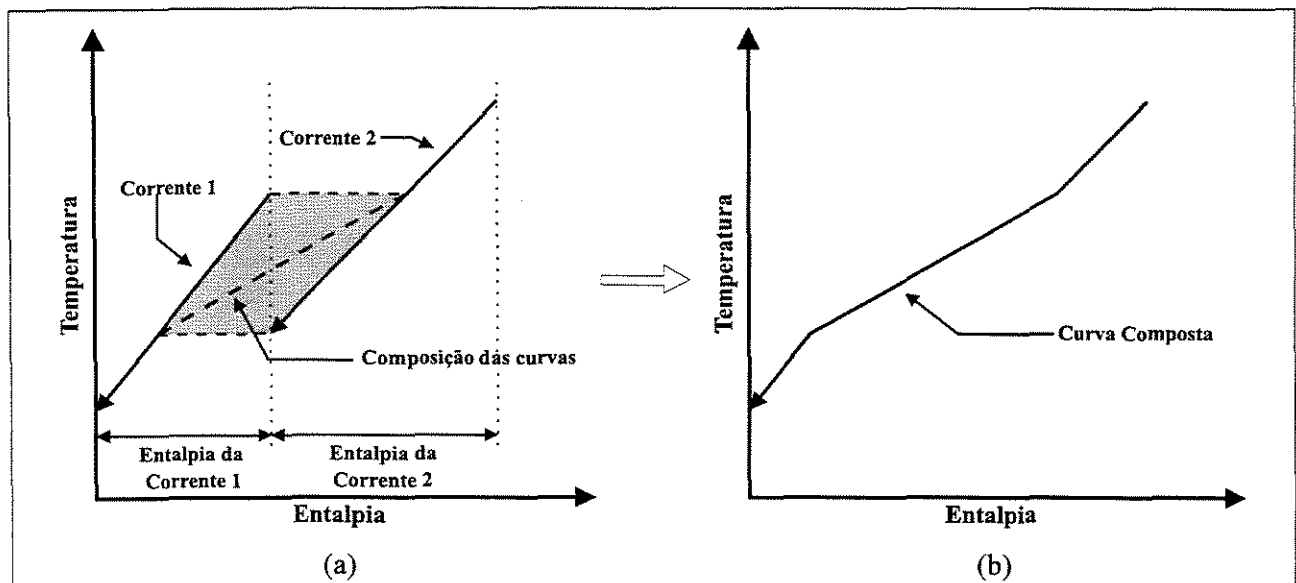
A figura mostra três regiões distintas:

- a área hachurada em que as correntes trocam calor entre si;
- uma segunda região em que a corrente quente é suprida com utilidade fria;
- e uma terceira em que a corrente fria é suprida com utilidade quente.

Na realidade, no diagrama **TxE** realiza-se um balanço energético entre as correntes, definindo-se quanto de calor será trocado entre estas e quais os consumos de utilidades quente e fria, necessários para satisfazer cada corrente.

Um balanço energético, semelhante ao apresentado na figura, também pode ser realizado em um processo envolvendo muitas correntes. Por exemplo, em um processo composto por quatro correntes, duas quentes e duas frias, também é possível realizar um balanço energético utilizando o diagrama **TxE**. Neste caso, há a necessidade da construção da curva composta quente e da curva composta fria, além do estabelecimento da mínima diferença de temperatura entre as correntes, o  $\Delta T_{min.}$ .

Inicialmente, as duas correntes quentes são representadas como mostrado na figura 2.2.a, onde a corrente de temperatura de saída mais baixa é representada primeiro seguida pela segunda corrente, deslocando-se esta no eixo da entalpia o correspondente à entalpia da primeira corrente. Pode-se perceber no eixo da temperatura, que as duas correntes têm uma faixa de temperatura em comum. Esta é a região de composição das duas curvas, representada pela região hachurada na figura, com a linha tracejada em diagonal sendo o resultado da composição das duas correntes, a qual representa a soma das capacidades térmicas das correntes. O resultado é a curva composta mostrada na figura 2.2.b.



**Figura 2.2** - Construção da curva composta quente para duas correntes

O mesmo procedimento que foi utilizado na construção da curva composta quente pode ser aplicado para a geração da curva composta fria. Através da representação das correntes em um mesmo diagrama  $T \times H$  e da composição das faixas de temperatura comum entre as correntes, como mostrado na figura 2.3.

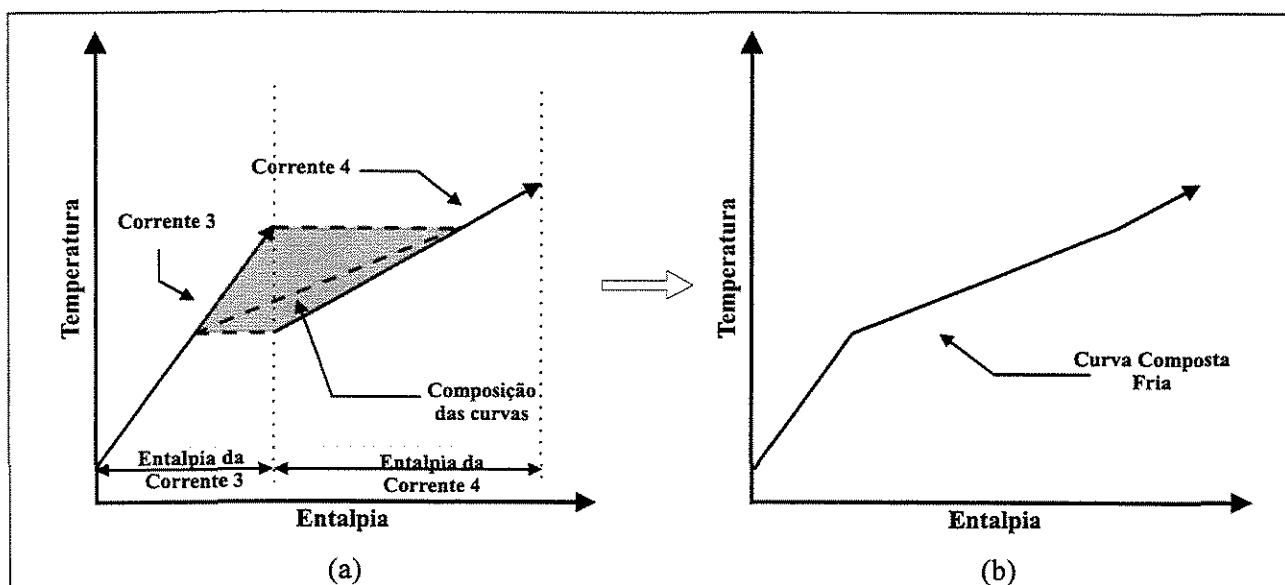


Figura 2.3 - Construção da curva composta fria para duas correntes

Estabelecendo-se uma diferença mínima de temperatura,  $\Delta T_{min}$ , entre as duas curvas compostas é possível representar graficamente as duas curvas em um mesmo diagrama  $T \times E$ . Esta representação define o grau de integração de energia para o processo, ou seja, a máxima recuperação de energia que se pode obter no processo. Por consequência, também já estão definidos os mínimos consumos de utilidades, quente e fria, como mostrado na figura 2.4.

O balanço de energia, realizado utilizando o diagrama  $T \times E$ , estabelece que qualquer que seja o  $\Delta T_{min}$  a diferença de entalpia entre as curvas compostas, quente e fria, é constante, significando também que a diferença entre o consumo de utilidades quentes e o consumo de utilidades frias também é constante, como é mostrado na figura 2.5. Esta é uma restrição imposta pela Primeira Lei da Termodinâmica. No entanto, como é sabido a aplicação da Primeira Lei não impede a transferência de calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente. Portanto, faz-se necessária a aplicação da Segunda Lei da Termodinâmica para evitar situações fisicamente impossíveis. Logo, deve existir um  $\Delta T_{min}$ , necessariamente positivo, para que uma corrente quente possa trocar calor com uma corrente fria sem que ocorram violações físicas.

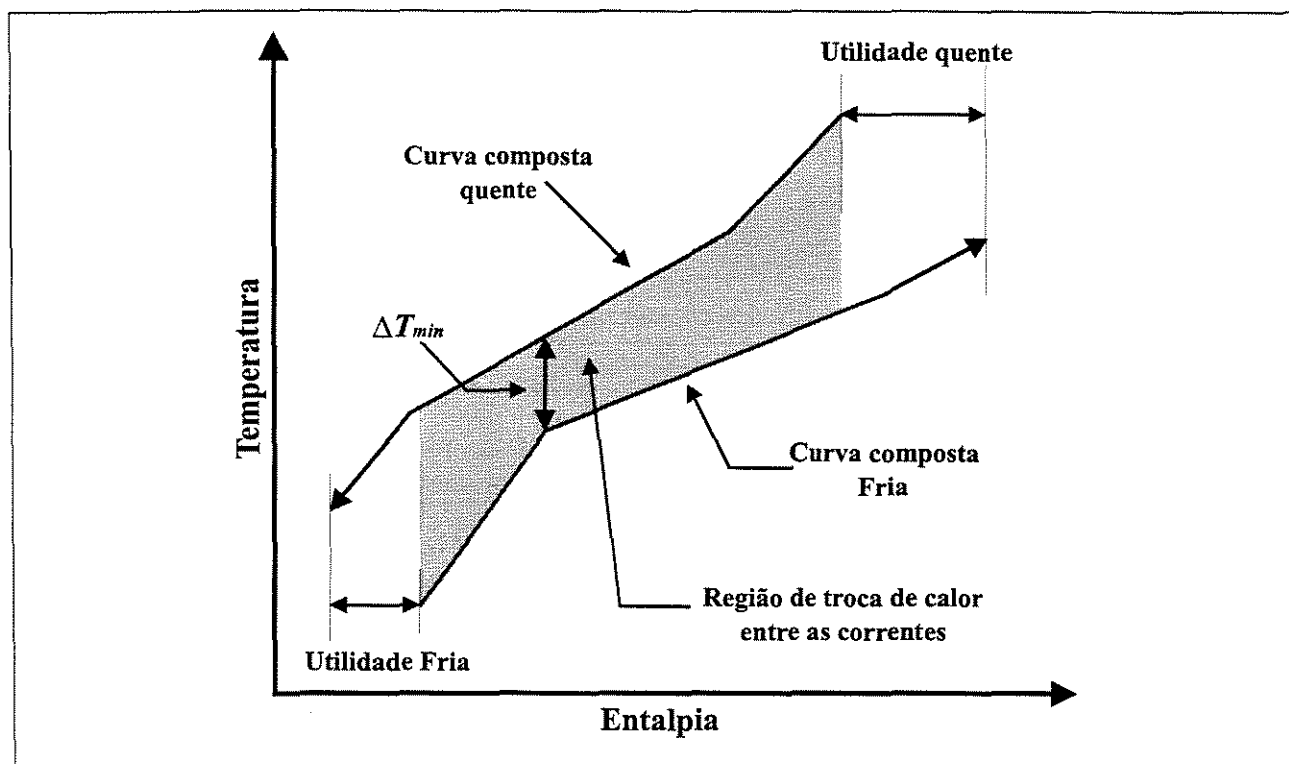


Figura 2.4 - Diagrama Temperatura versus Entalpia para as correntes, quentes e frias

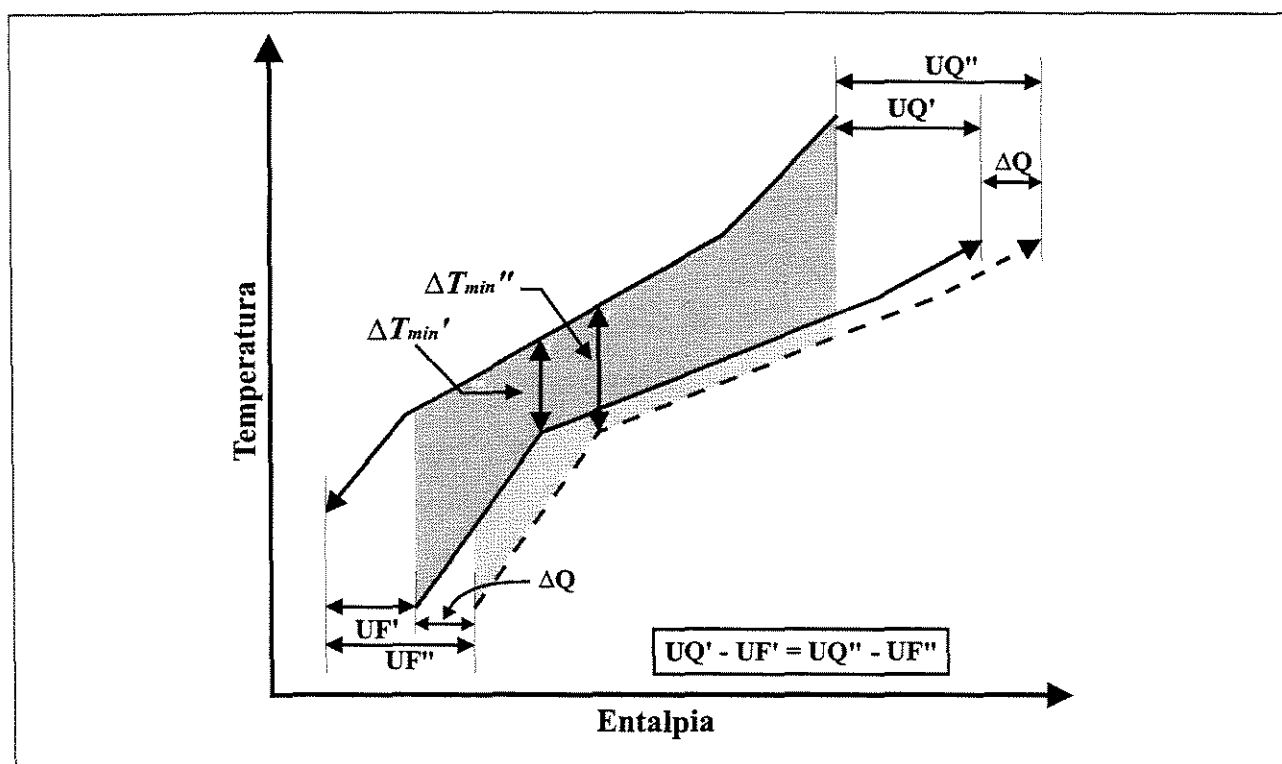


Figura 2.5 Diagrama TxE para dois  $\Delta T_{min}$  diferentes, mostrando que a diferença entre os consumos de utilidades permanece constante

### 2.4.2 $\Delta T_{min}$ e o conceito de *pinch*

O  $\Delta T_{min}$ , como pode ser observado na figura 2.4, estabelece o local onde as curvas compostas estão mais próximas, sendo este ponto conhecido como *pinch* (LINNHOFF e FLOWER, 1983). Nas proximidades do ponto *pinch*, as trocas de calor entre as correntes são mais restritas que nas regiões mais afastadas a este. Isto se deve ao fato que nas proximidades do ponto *pinch* as forças motrizes são menores e restringem a alocação de área entre as correntes. Já nas regiões mais afastadas do *pinch*, a alocação de área é mais favorável, devido a forças motrizes maiores.

O ponto *pinch* tem também a peculiaridade de dividir o problema de integração energética em duas partes termodinamicamente independentes:

- acima do *pinch*;
- abaixo do *pinch*.

Segundo o conceito *pinch*, para que o  $\Delta T_{min}$  seja respeitado, não deve haver transferência de calor através do *pinch*. Isto significa que o fluxo de calor através do ponto *pinch* é nulo, indicando que o problema de integração pode ser dividido no ponto *pinch*. Pode-se observar no diagrama TxE que se o problema é dividido no ponto *pinch*, na região de temperaturas mais elevadas só necessita-se de utilidades quentes, esta região é conhecida como acima do *pinch*. Já na região de temperaturas mais baixas necessita-se apenas de utilidades frias, sendo esta região conhecida como abaixo do *pinch*. Esta característica é consequência do balanço de energia realizado entre as correntes no diagrama TxE.

## 2.5 Conceito de Transferência de Calor Vertical

O conceito de *pinch* estabelece que não se deve trocar calor de ramos de correntes acima do *pinch* com ramos de correntes abaixo do *pinch*. Se esta situação ocorrer haverá a transferência de calor através do *pinch*, com violação do  $\Delta T_{min}$ . Caso seja necessário restaurar o  $\Delta T_{min}$  haverá um aumento no consumo de utilidades, tanto para quentes quanto para frias, na mesma quantidade, já que a primeira Lei da termodinâmica deve ser obedecida. Portanto, o princípio básico do conceito *pinch* é evitar a transferência de calor através do *pinch* para garantir o consumo mínimo de utilidades, para um dado nível de recuperação de energia. Como calcular a área de troca térmica antes do projeto da rede e garantir que esta tenha um valor otimizado, ou seja, mínimo?

O cálculo da área mínima de troca térmica entre as correntes de um processo é mais complicada que o cálculo do consumo de energia. No entanto, a utilização do diagrama **TxE** ajuda não só a compreender o conceito de *pinch*, bem como a entender o conceito de transferência de calor vertical entre as correntes, o qual tem grande importância no cálculo de área mínima.

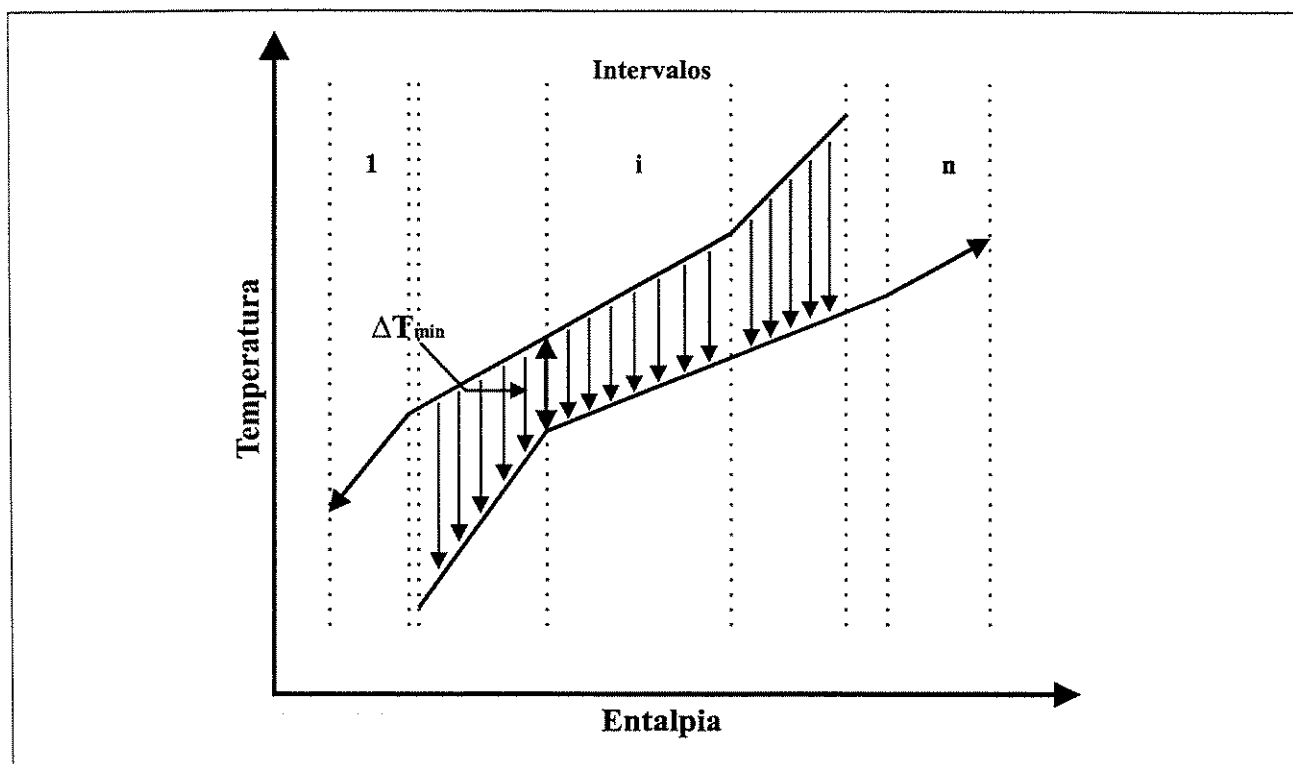
O diagrama **TxE** pode ser dividido em intervalos de entalpia, que na realidade são as divisões do eixo de entalpia a cada descontinuidade de uma das curvas compostas, como apresentado na figura 2.6. Segundo o conceito de transferência de calor vertical, as partes de correntes quentes e frias pertencentes a um dado intervalo só podem trocar calor neste intervalo. Uma vez que o balanço de energia é satisfeito em cada intervalo, o somatório do calor disponível entre as correntes quentes em um dado intervalo é igual ao somatório do calor requerido pelas frias neste mesmo intervalo. Esta consideração permite que a área de troca térmica entre as correntes possa ser calculada pela equação:

$$A_{min} = \sum_n \frac{1}{\Delta T_{LMn}} \sum_s \frac{q_s}{h_s} \quad \text{Eq. 2.1}$$

onde  $A_{min}$  é a área mínima de troca térmica entre correntes quentes e frias,  $\Delta T_{LMn}$  a média logarítmica de temperatura no intervalo  $n$ ,  $q_s$  a variação de entalpia da corrente  $s$  no intervalo  $n$  e  $h_s$  o coeficiente convectivo de transferência de calor da corrente  $s$ .

A equação 2.1 garante área mínima se os coeficientes convectivos de transferência de calor forem iguais, mas em um processo real raramente as correntes possuem os mesmos coeficientes. Para o cálculo da área mínima verdadeira, com coeficientes diferentes, é necessária a utilização de técnicas de programação matemática, com a formulação de um modelo de relativa complexidade. No entanto, MORTON (1986) mostra que se os coeficientes convectivos são da mesma ordem de grandeza o erro incorrido em utilizar a equação 2.1 situa-se abaixo do 10%, de modo que esta equação pode ser utilizada na estimativa da área “mínima” de troca térmica de redes de trocadores de calor.

O conceito de transferência de calor vertical foi de extrema importância para o desenvolvimento do presente trabalho, pois todo o cálculo de área baseia-se neste princípio, já que com este conceito é possível estimar áreas próximas da mínima.



**Figura 2.6** - Transferência de calor vertical entre as correntes de um processo

## 2.6 Relações Entre Área e Energia

As estimativas de área mínima e consumo mínimo de energia em uma rede de trocadores de calor, possibilitam a realização de uma análise econômica antes do projeto da rede. Em estudos de síntese de redes de trocadores de calor, em processos novos e em *retrofit*, basicamente dois custos estão envolvidos diretamente:

- custo de operação do processo, ligado ao consumo de energia;
- o custo de investimento, ligado à alocação de área na rede.

Desde que as funções de custo estejam disponíveis, pode-se estimar o custo global da rede, sendo este custo dependente do nível de recuperação de energia escolhido, isto é, do  $\Delta T_{min}$ . A escolha do  $\Delta T_{min}$  sempre foi baseada na experiência do projetista, mas com o desenvolvimento das técnicas de integração energética esta pode ser escolhida em função do custo mínimo da rede.

Como pode ser observado na figura 2.7(a), o consumo de energia mínimo em uma rede aumenta à medida em que o  $\Delta T_{min}$  aumenta, que leva a um aumento da distância entre as curvas compostas, diminuindo a região de troca de calor entre as correntes. Já no caso da área, o

aumento do  $\Delta T_{min}$  provoca um efeito contrário àquele observado no requerimento de energia, à medida que o  $\Delta T_{min}$  aumenta, a área requerida para a troca térmica diminui, como consequência do distanciamento das curvas compostas, como pode ser observado na figura 2.7(b). Conhecida a dependência do consumo de energia e da área em relação ao  $\Delta T_{min}$ , pode-se então relacionar a área e energia, como ilustrado na figura 2.8.

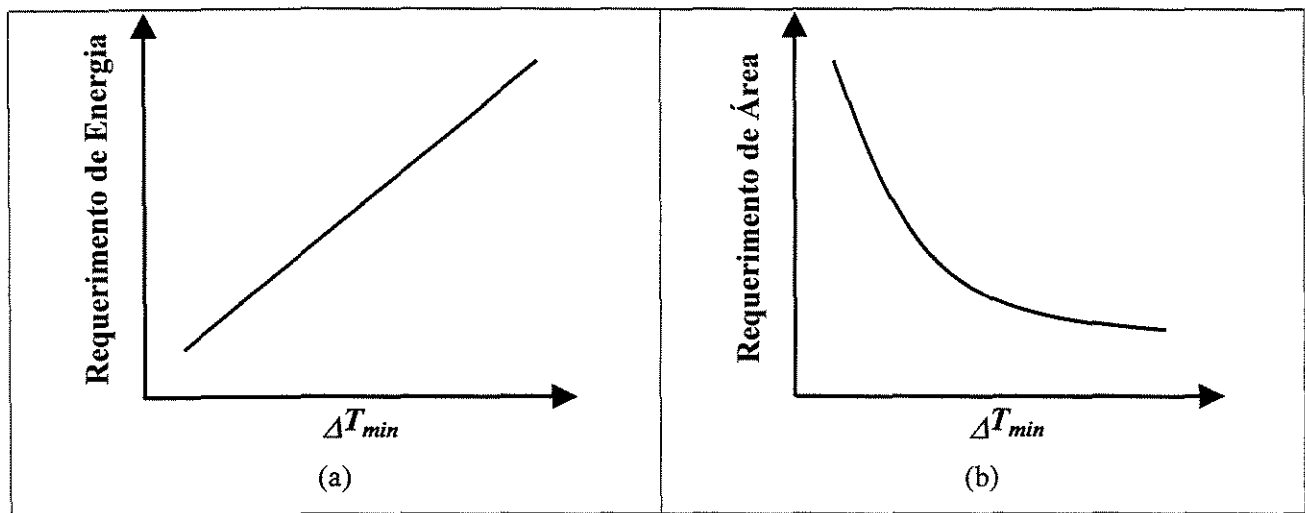


Figura 2.7 – Relação entre o  $\Delta T_{min}$  e os requerimentos de área e energia

A figura 2.8 mostra que para pequenos valores de  $\Delta T_{min}$  o processo requer pequeno consumo de energia, mas uma grande superfície de área. Já em grandes valores de  $\Delta T_{min}$ , o processo requer um elevado consumo de energia, mas uma pequena superfície de área. Esta figura mostra ainda uma região abaixo da curva de área mínima, na qual não é possível a realização da integração energética do processo.



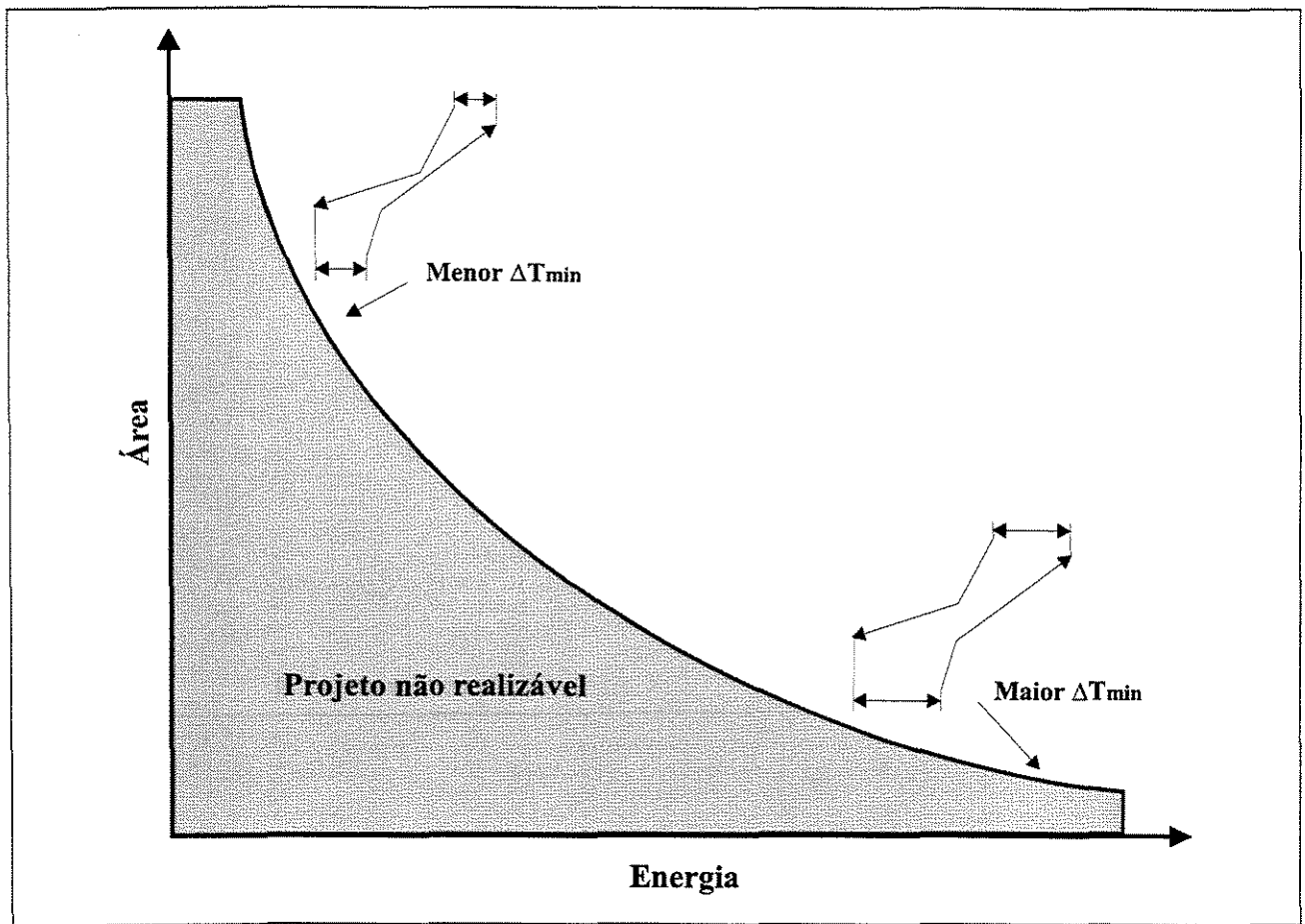


Figura 2.8 – Relação entre área e energia em integração

### 2.6.1 Projetos novos e modificações em redes de trocadores de calor

A estimativa de custos em integração energética baseia-se fundamentalmente nas relações entre área e energia. Como foi apresentado no tópico anterior, área e energia tem comportamentos inversos em relação ao  $\Delta T_{min}$ . Utilizando funções para a estimativa de custo de área e energia pode-se determinar, em síntese de novas redes, um ponto de custo mínimo, como apresentado na figura 2.9(a). Este ponto determina o  $\Delta T_{min}$  ótimo para a realização do projeto da rede. Já para *retrofit*, o  $\Delta T_{min}$  para o projeto da rede também pode ser determinado utilizando funções de custo. No entanto, este estará diretamente relacionado ao tempo de retorno do capital investido na modificação da rede, como apresentado na figura 2.9(b).

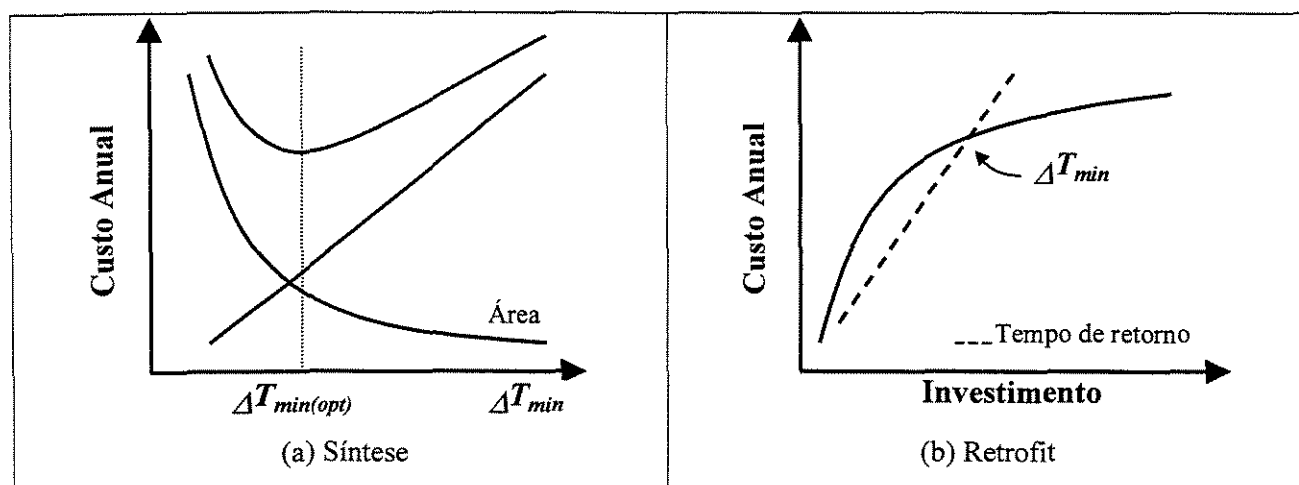


Figura 2.9 – Relação entre custo e consumo de energia

Portanto, a aplicação de técnicas de integração energética baseia-se na relação existente entre área e energia para uma estimativa de custos de projeto, resultando na determinação de  $\Delta T_{min}$  o qual será utilizado, tanto no projeto de uma nova rede, como na modificação de um processo existente.

## 2.7 Conclusões Preliminares

A partir das curvas compostas, que realizam um balanço energético entre as correntes foi possível a definição de dois novos conceito que criaram uma maneira sistemática de abordagem dos problemas de análise energética, o conceito de ponto *pinch* e o conceito de transferência de calor vertical entre as correntes. Com estes conceito foi possível estabelecer para um dado nível de recuperação de energia quais as relações existentes entre a área e energia, possibilitando a realização de uma análise econômica antes do projeto da rede.

A análise econômica, como foi apresentado neste capítulo, pode ser realizada, tanto em novos projetos de redes como em modificação de processos existentes, onde os objetivos são específicos para cada caso. No caso de novos processos deseja-se uma rede com custo mínimo, já no caso do *retrofit*, o capital a ser investido e o tempo de retorno de capital determinam qual o nível de recuperação que deve ser estabelecido para o projeto da rede.

## **Capítulo 3 - RETROFIT DE REDES DE TROCADORES DE CALOR – MÉTODOS TRADICIONAIS**

### **3.1. Introdução**

A análise energética de processos, como foi apresentado no capítulo introdutório, pode ser aplicada a uma grande quantidade de situações. No entanto, aplicações de estudos de integração energética, de uma maneira extremamente simplista, resumem-se ou ao desenvolvimento de uma rede de trocadores de calor, síntese, ou à modificação de uma rede de trocadores, *retrofit*, para a satisfação de expectativas energéticas, ditadas por aspectos econômicos. Estes estudos levam essencialmente à resolução de um problema de otimização, caracterizados pela necessidade do desenvolvimento de uma estrutura ótima. No caso de *retrofit*, deseja-se satisfazer condições pré-estabelecidas ou de tempo de retorno ou de investimento máximo.

Na literatura, são propostas uma quantidade relevante de estratégias para o tratamento dos problemas de *retrofit*, baseadas ou em métodos matemáticos de otimização, ou em métodos termodinâmicos associados a regras heurísticas. Ambos os métodos, têm por objetivos primordiais: primeiro, uma estimativa dos custos envolvidos no *retrofit* da rede e segundo, a confecção de uma malha de troca térmica, concordante com a estimativa inicial.

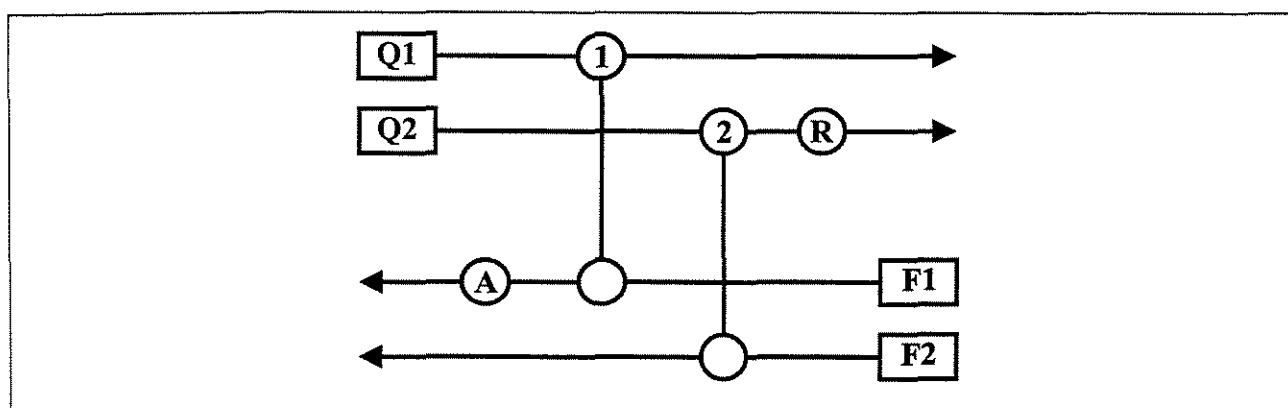
Neste capítulo, será dedicada atenção especial aos principais métodos de *retrofit* de rede de trocadores de calor presentes na literatura, ressaltando suas vantagens e limitações, que serão úteis no desenvolvimento de uma nova metodologia, que será exposta em capítulos posteriores.

### **3.2. Análise Retrofit por Inspeção**

Estudar *retrofit* de processos, de uma maneira geral, sempre foi uma tarefa muito complexa. A existência de um processo cria uma dificuldade que não ocorre no desenvolvimento de novos processos: a necessidade do aproveitamento de equipamentos existentes. Mesmo em *retrofit* de redes de trocadores de calor, onde apenas trocadores são os equipamentos considerados, os estudos foram por muito tempo postergado, devido ao caráter combinatorial do problema. No entanto, antes do desenvolvimento dos métodos sistemáticos, os engenheiros de projeto já realizavam *retrofit* em seus processos. Para fugir das características combinatoriais do problema, eles utilizavam seus conhecimentos do processo, contando com sua intuição. Estes métodos, foram reportados na literatura como métodos de inspeção, pois inicialmente o engenheiro

realizava uma inspeção na rede de trocadores, para então a partir do conhecimento do processo escolher regiões que deveriam sofrer modificações, tendo em vista a redução do consumo de energia.

O método de inspeção, em redes de trocadores, baseia-se fundamentalmente na escolha de correntes do processo que possibilitem a redução do consumo de energia, mas por ser puramente intuitivo não garante resultados ótimos. Uma regra a ser seguida é que correntes escolhidas necessariamente devem ser supridas com utilidades. Por exemplo, na figura 3.1 as duas correntes escolhidas através da inspeção seriam as correntes Q2 e F1.



**Figura 3.1** Rede de trocadores para ilustrar o método de inspeção

Pode-se definir uma sequência de etapas par o método de inspeção em *retrofit* de redes (SHENOY, 1995), as quais envolvem:

- Definição de um tempo de retorno (*Payback*);
- cálculo da área total da rede;
- seleção da posição de novos trocadores;
- cálculo da recuperação de energia;
- cálculo do aumento de área;
- análise de custos.

A relação entre as etapas do método são melhor ilustradas na figura 3.2. O passo inicial para a realização de *retrofit* em uma rede é a definição do tempo de retorno do capital investido, ou a definição de um investimento máximo de capital. A segunda etapa seria o cálculo da área existente na rede. O passo seguinte envolve o conhecimento do engenheiro de projeto, com a escolha das correntes e a definição do posicionamento de novos trocadores. A partir daí, segue-se

um procedimento iterativo que termina quando atinge-se o objetivo econômico. Uma vez selecionadas as correntes e posicionados os novos trocadores, é possível determinar quais trocadores serão afetados pelas modificações na distribuição de carga térmica da rede, podendo-se então definir a área destes trocadores como uma função da nova carga térmica alocada nos novos trocadores. Em seguida calcula-se os custos da nova área alocada tanto nos trocadores novos quanto nos trocadores existentes, e verifica-se se o objetivo econômico foi satisfeito. Se positivo, aceita-se a nova distribuição de carga térmica da rede, se negativo incrementa-se a carga térmica nos trocadores novos até que o objetivo seja satisfeito.

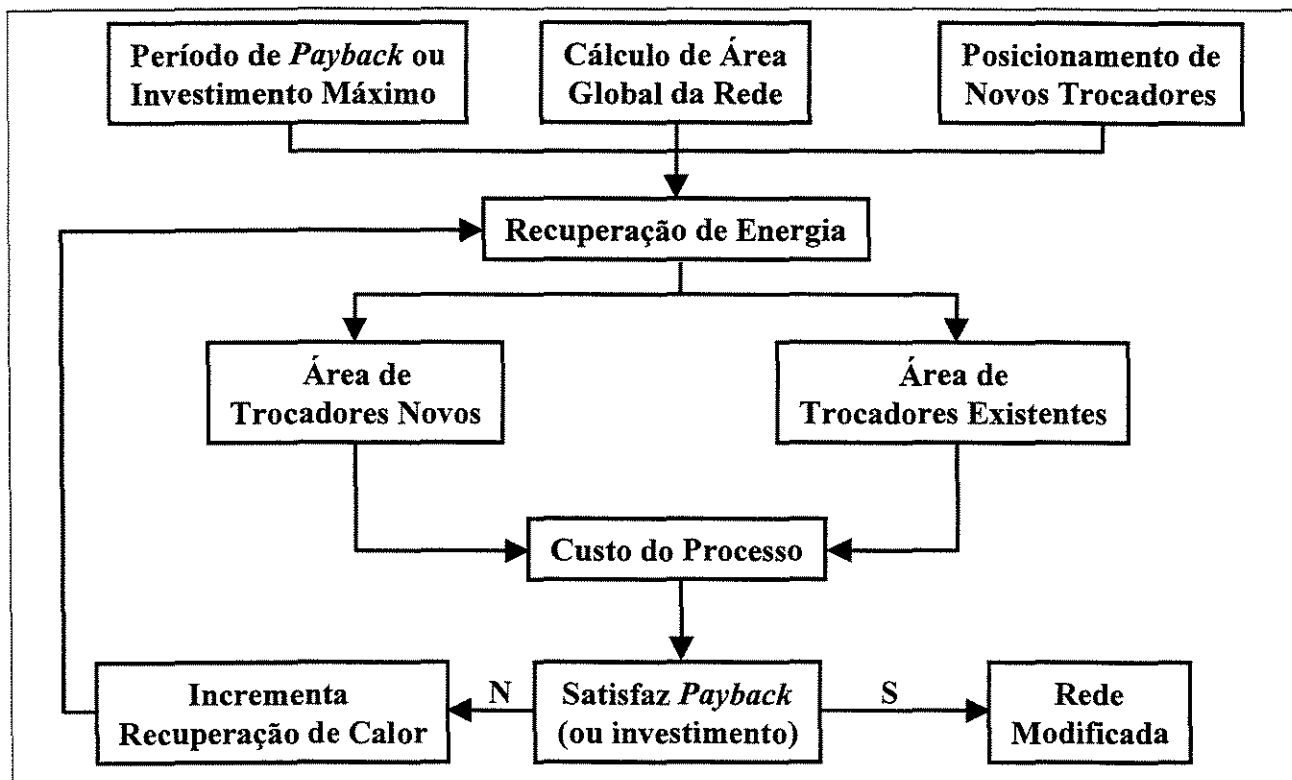


Figura 3.2 – Estratégia de Retrofit por inspeção

As violações de temperatura podem ser previstas pela relação entre a área e a distribuição da nova carga térmica, limitando a alocação desta a valores fisicamente possíveis. O método representa uma maneira interessante de reduzir o consumo de energia, mas em redes com um elevado número de trocadores os cálculos ficariam mais complexos, além das restrições de violação de temperatura se tornarem mais presentes e dificultarem a solução dos problemas de retrofit.

### **3.3. Métodos Matemáticos de Otimização**

Os métodos matemáticos de otimização se caracterizam por utilizarem técnicas vindas da pesquisa operacional, que foram adaptadas aos problemas de integração energética. Estes métodos se baseiam no desenvolvimento de uma super-estrutura para a representação de todas as configurações de malha que possam ser geradas. No entanto, para casos de porte industrial o problema toma proporções consideráveis, sendo necessária a adoção de regras heurísticas, eliminando portanto a garantia de resultados ótimos, para a solução destes problemas.

O *retrofit* de redes abordado do ponto de vista dos métodos matemáticos de otimização, é um problema de programação inteira mista não linear (*Mixed Integer Non-Linear Programming – MINLP*), uma vez que geralmente deseja-se gerar uma estrutura com um custo mínimo. A resolução de um modelo desta natureza está entre os problemas de otimização mais difíceis de serem resolvidos. Estas dificuldades decorrem de três fatores: a formulação matemática do problema é complexa, já que a estrutura do processo deve ser considerada; a disponibilidade de método que trate o problema de forma simultânea, isto é, os métodos de otimização disponíveis dividem o problema em duas partes, primeiro resolvem a parte inteira e em seguida a parte não linear; mesmo com computadores altamente velozes, com grande capacidade de memória e poder de processamento, o caráter combinatorial é uma limitação para problemas de porte industrial.

Os fatores citados acima conduzem a um desinteresse da aplicação de métodos matemáticos a situações industriais, restringindo estes ao meio acadêmico e a institutos de pesquisa. Entretanto, alguns trabalhos são de grande relevância, como os apresentados por YEE e GROSSMANN (1987), CIRIC e FLOUDAS (1990) e YEE e GROSSMANN (1991). Estes trabalhos representam o estado da arte de aplicações de métodos de programação matemática a casos de *retrofit*.

### **3.4. Métodos Termodinâmicos**

A literatura a respeito de *retrofit* de rede mostra que assim como a síntese de novas redes, o desenvolvimento de metodologias consistentes aconteceu quase que simultaneamente nas duas principais linhas de desenvolvimento. No entanto, devido aos métodos termodinâmicos tratarem qualquer tamanho de problema, uma vez que foge-se do caráter combinatorial, intrínseco em *retrofit* de redes, estes tornaram-se mais aceitos para os casos industriais, apesar de não haver garantias de solução ótima.

A aplicação dos métodos termodinâmicos para o *retrofit* de redes foi derivada da síntese de redes, onde a metodologia mais difundida é aquela baseada na análise *Pinch*, utilizando os conceitos de consumo mínimo de utilidades e transferência de calor vertical entre as correntes, apresentados no capítulo anterior. Além destes conceitos as metodologias aqui descritas ainda utilizam o conceito de eficiência de área, para situar o caso estudado em relação a uma rede com área mínima.

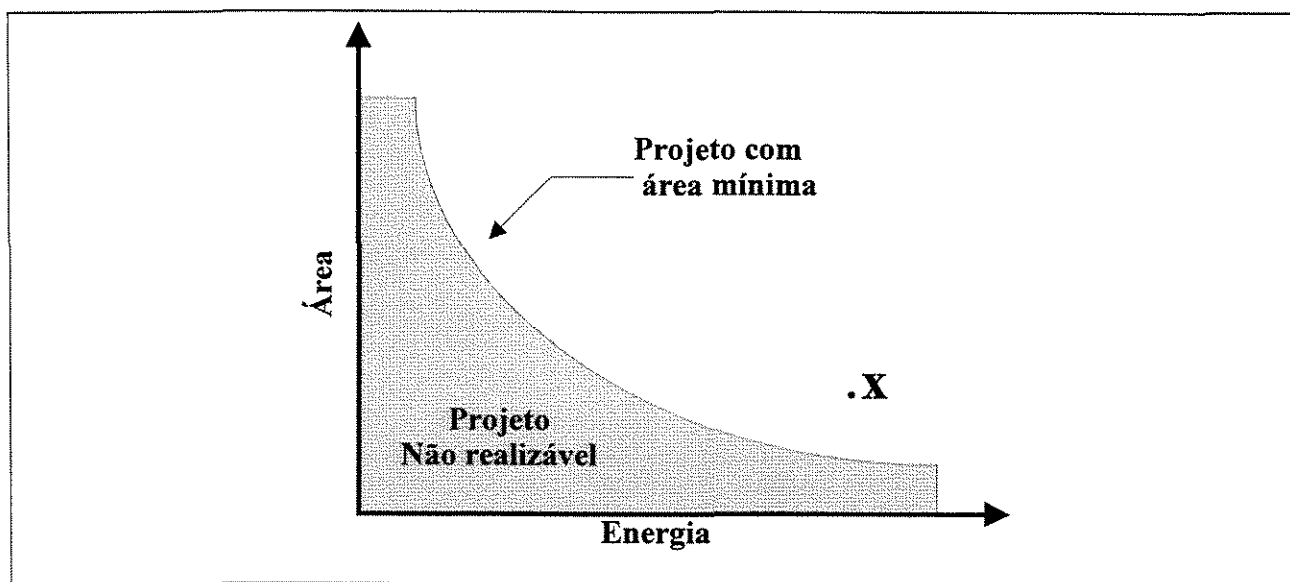
### 3.4.1 Análise energética tradicional

A análise energética em redes de trocadores de calor existentes tomou outra dimensão após os estudos de TJOE (1986), com a proposta de uma avaliação sistemática do problema, baseando-se nas Leis da Termodinâmica e no cálculo de eficiência de área. Com relação a aplicação das Leis da Termodinâmica estas se dão de modo semelhante ao apresentado no capítulo anterior, sendo que os balanços energéticos realizados nas correntes possibilitam situar a rede existente em relação a uma rede com consumo mínimo de energia. Isto permite também que se faça uma avaliação com que eficiência a área está alocada na rede, como será visto mais adiante.

#### 3.4.1.1 Balanço energético aplicado a processos existentes

Foi apresentado no capítulo anterior que desde que seja determinado um nível de recuperação de energia é possível a realização de balanços energético entre as correntes, que tem por consequência a definição do consumo mínimo de utilidades. Um processo existente já possui um consumo de energia definido em que está operando. Quando se realiza o *retrofit* da rede, reduz-se o consumo de energia através do aumento da área, mas antes deve-se realizar uma avaliação com que eficiência a área está alocada. Esta análise tem por objetivo situar a rede estudada em relação a uma rede com área mínima de troca térmica, em um diagrama **Área Energia**, semelhante ao apresentado na figura 3.3.

Na figura, o ponto **X** representa o processo a ser otimizado, o qual está situado da curva de área mínima, indicando que os trocadores alocados não estão posicionados verticalmente, e portanto utilizam ineficientemente a área alocada na rede.



**Figura 3.3** – Localização de um processo em relação a o projeto com área mínima

O posicionamento do processo em relação a curva com área mínima propicia mensurar a eficiência com que a área existente está alocada em relação a uma rede com transferência de calor vertical, através da equação:

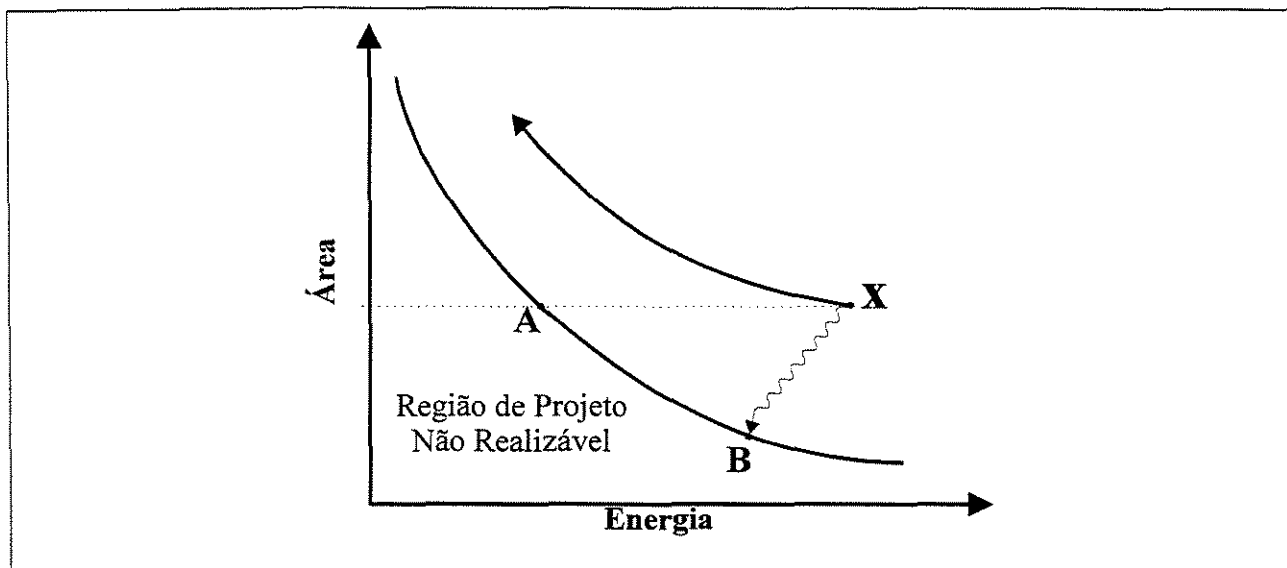
$$\alpha = \frac{A_{\min}}{A_{ex}} \quad \text{Eq. 3.1}$$

onde  $\alpha$  é a eficiência de área,  $A_{\min}$  a área mínima para transferência de calor vertical e  $A_{ex}$  a área de troca térmica da rede existente. A partir deste ponto pode-se traçar estratégias para a realização do *retrofit* da rede. Na figura 3.4 estas estratégias podem ser melhor compreendidas.

A figura 3.4 mostra três pontos que são de grande importância para o estudo de *retrofit* e a avaliação das possibilidades de otimização energética de processos existentes, que fazem uso ineficiente dos recursos energéticos disponíveis. O início de todo o estudo é o ponto **X**, já apresentado na figura 3.3, que localiza o processo em relação à situação de transferência de calor vertical. Supondo que **B** seja um ponto de projeto ótimo, onde o  $\Delta T_{\min}$  neste ponto leva a um custo global mínimo, o objetivo inicial seria atingir este ponto. No entanto, a área existente deve ser aproveitada de modo que o novo objetivo passaria a ser o ponto **A**, onde o aproveitamento de toda a área existente levaria a uma redução drástica do consumo de energia no processo. Entretanto não é possível atingir o ponto **A**, pois alguns trocadores não verticais não podem ser reposicionados de modo vertical, e uma vez que o ponto **A** é um local onde toda a rede está alocada verticalmente, não é possível atingir este ponto. Portanto, a alternativa seria elevar a área



de troca térmica com a finalidade de aumentar a redução do consumo de energia, e um caminho como o representado pela curva com a seta.



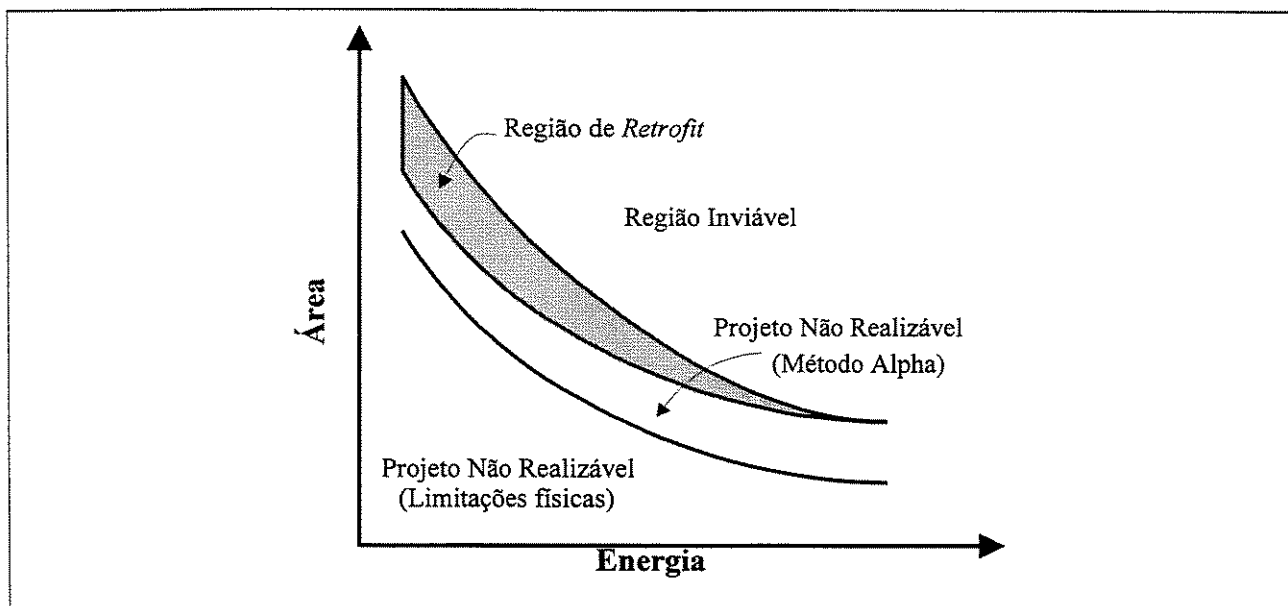
**Figura 3.4** – Estratégias de *retrofit* pelo método  $\alpha$

Segundo TJOE (1986), partindo do princípio de avaliação de eficiência de área da rede existente, duas situações limites podem ocorrer na análise de *retrofit* pela análise tradicional:

- a utilização a equação 3.1 para definir a eficiência de área da rede, e considerar que todo trocador novo alocado na rede terá a mesma eficiência da rede;
- a outra situação é considerar que a diferença entre a área mínima e a área da rede existente para o novo nível de recuperação de energia será a mesma que existia para o antigo nível.

A primeira hipótese considera que o valor de  $\alpha$  é mantido constante, pois a eficiência antes e depois do *retrofit* seriam as mesmas. Este é um modo conservativo de estimativa de custos. Já a outra hipótese, considera que o valor de  $\alpha$  pode ser incrementado, pois a eficiência de alocação de área aumenta à medida que o nível de recuperação aumenta. Estas duas situações estão ilustradas na figura 3.5 e delimitam uma região onde é viável o retrofit da rede, sinalizado pela área hachurada. Acima desta região o *retrofit* da rede é inviável, pois a rede operará com eficiência de área menor que a existente antes da modificação. Já abaixo desta área, não seria possível a realização do retrofit, pois mesmo considerando que a área a ser alocada poderia ser vertical, a área excedente à mínima continuaria sendo a mesma. Deve-se portanto, escolher uma

estratégia de *retrofit* que será função da eficiência da rede existente, caso a rede já opere com elevada eficiência de área pode-se adotar  $\alpha$  constante. Já no caso da rede operar com baixa eficiência de área pode-se utilizar o  $\alpha$  incremental.



**Figura 3.5** – Região de *retrofit* pelo método Alpha

No capítulo anterior, foi mostrado que no caso de *retrofit*, a determinação do  $\Delta T_{min}$  deve ser realizada antes do projeto da rede, assim como no caso da síntese de redes. Entretanto, enquanto o projeto de novas redes requer apenas a relação entre custo área e energia para a determinação do  $\Delta T_{min}$  a ser utilizado, no caso do *retrofit* de redes deve haver um balanço entre a área, energia e o tempo de retorno do capital investido. A relação entre estas variáveis é apresentada na figura 3.6.

A figura 3.6, mostra que quanto maior o investimento em área, maior será o retorno de capital. Em contra-partida o tempo de retorno do capital investido também será elevado, levando a um pequeno  $\Delta T_{min}$ . Já para situações em que o investimento é pequeno, consequentemente a redução no consumo de energia será pequena, com um tempo de retorno de capital também pequeno. Neste caso o  $\Delta T_{min}$  a ser utilizado será elevado, indicando pequena integração entre as correntes.

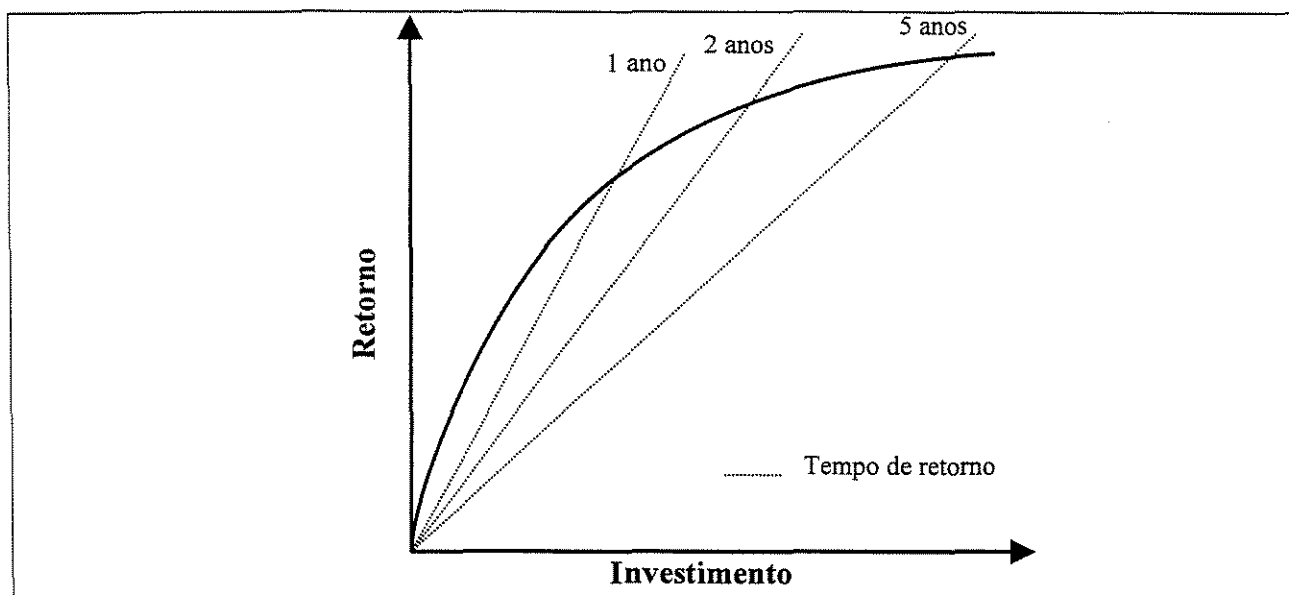


Figura 3.6 – Relação entre o tempo de retorno e o investimento necessário em uma rede

#### 3.4.2 Considerações estruturais – Metodologia da matriz de área

A análise energética, desenvolvida por TJOE (1986) para *retrofit* de redes, teve como ponto forte a adaptação de princípios, desenvolvidos para a síntese, aplicados à modificação de processos existentes. Utilizando estes princípios não era possível considerar as características estruturais da rede existente, sendo considerada apenas para efeito da análise a área global da rede, portanto a eficiência de área global da rede. No entanto, os trocadores alocados em uma rede podem exibir diferentes eficiência de área, dependendo se ele está posicionado verticalmente.

Em decorrência de não considerar a estrutura da malha de troca térmica, a análise tradicional também não pode considerar que um trocador existente pode melhorar o seu posicionamento, aumentando sua verticalidade. Portanto, a estimativa de custo utilizando esta análise pode levar a avaliações econômicas imprecisas.

Em princípio, mesmo na estimativa de custo a consideração da estrutura da rede, levaria a uma abordagem de problemas *retrofit* através de métodos de programação inteira, trazendo de volta as dificuldades de natureza combinatorial para sua solução. Entretanto, SHOKOYA (1992) propôs um novo método em que seria possível realizar a estimativa de área considerando a distribuição de área na rede, sem que o problema fosse tratado com ferramentas matemáticas de programação inteira.

A área de troca térmica, alocada em uma rede, pode ser representada em uma matriz, onde por exemplo, nas colunas estão as correntes quentes e nas linhas as correntes frias. Cada célula desta matriz seria a área alocada entre uma corrente fria e uma corrente quente. Portanto, a área global da rede poderia ser dada pela equação:

$$A_{ex} = \sum_i \sum_j A_{ex(i,j)} \quad \text{Eq. 3.2}$$

onde  $A_{ex(i,j)}$  é a área alocada entre a corrente quente  $i$  e a corrente fria  $j$ .

O cálculo de área mínima para a transferência de calor vertical pode ser dado pela equação 2.1, como foi apresentado no capítulo anterior. No entanto, SHOKOYA (1992) representou esta equação para o cálculo de área mínima da rede de uma maneira diferente, de modo a satisfazer seus propósitos. Por meio de manipulações algébricas a equação 2.1 pode também ser escrita de modo a representar a área alocada entre as correntes, sendo representada da seguinte forma:

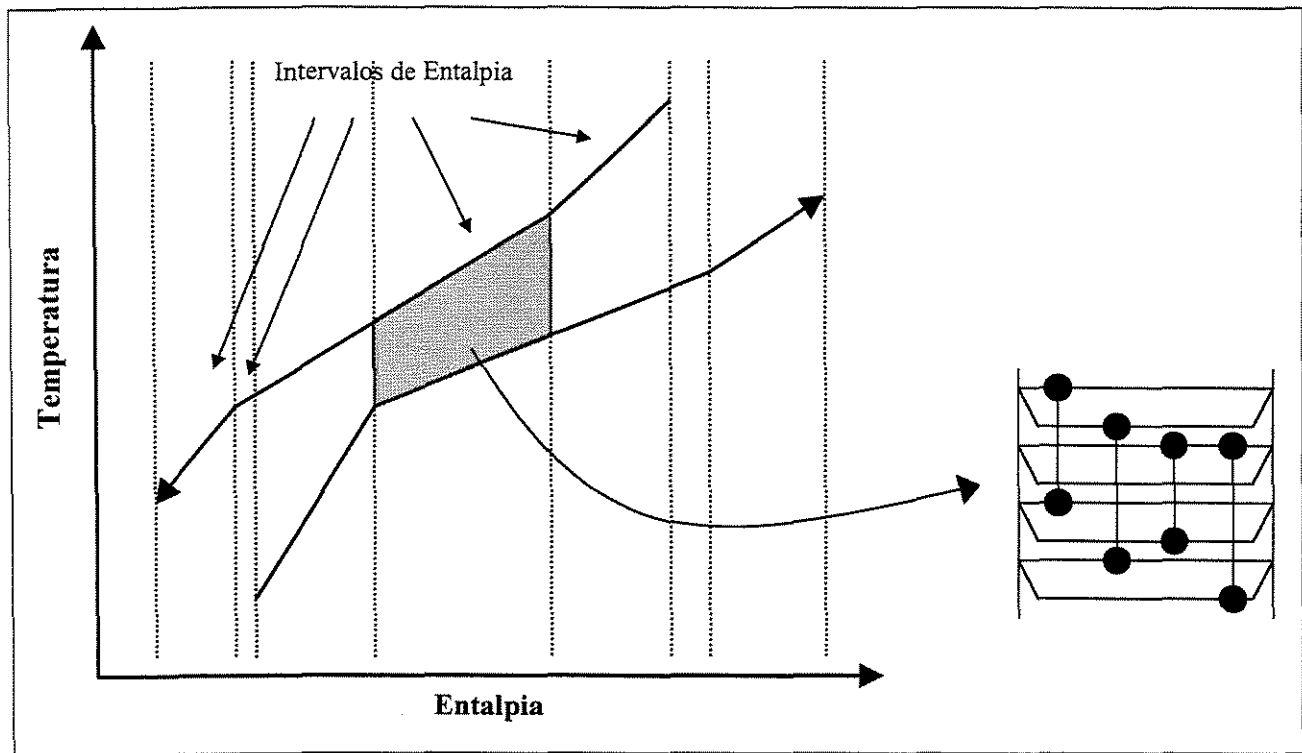
$$A_{min} = \sum_i \sum_j A_{v(i,j)} \quad \text{Eq. 3.3}$$

onde  $A_{v(i,j)}$  é a área vertical alocada entre a corrente quente  $i$  e a corrente fria  $j$ . A área vertical entre as correntes é dada por:

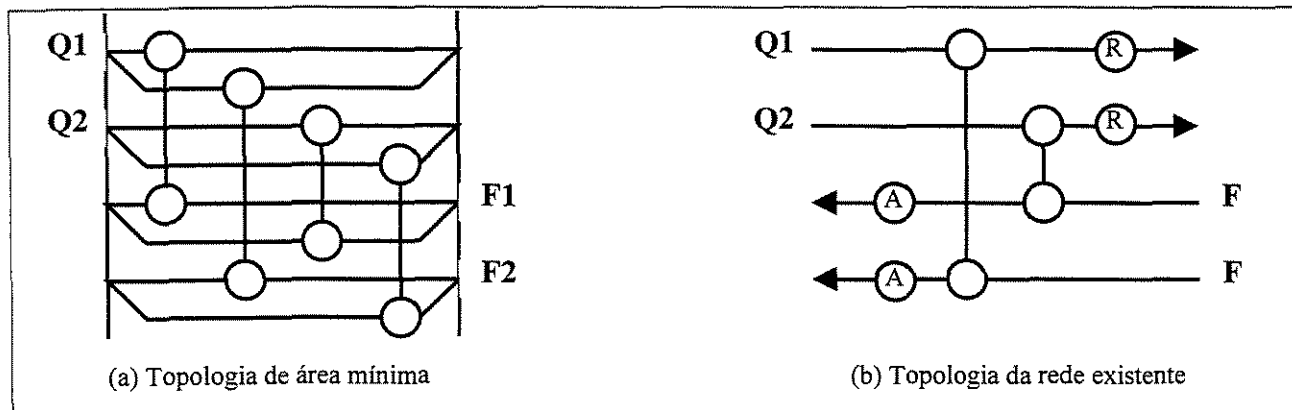
$$A_{v(i,j)} = \sum_k \frac{1}{\Delta T_{ln,k}} Q_{(i,j)k} \left( \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_j} \right) \quad \text{Eq. 3.4}$$

onde  $\Delta T_{ln,k}$  é a média logarítmica de temperaturas do intervalo  $k$ ,  $Q_{(i,j)k}$  o calor trocado entre a corrente quente  $i$  com a corrente fria  $j$  no intervalo  $k$ ,  $h_i$  o coeficiente convectivo de transferência de calor para a corrente quente  $i$  e  $h_j$  o coeficiente convectivo de transferência de calor para a corrente fria  $j$ . Esta equação não leva em conta os fatores de incrustação das correntes.

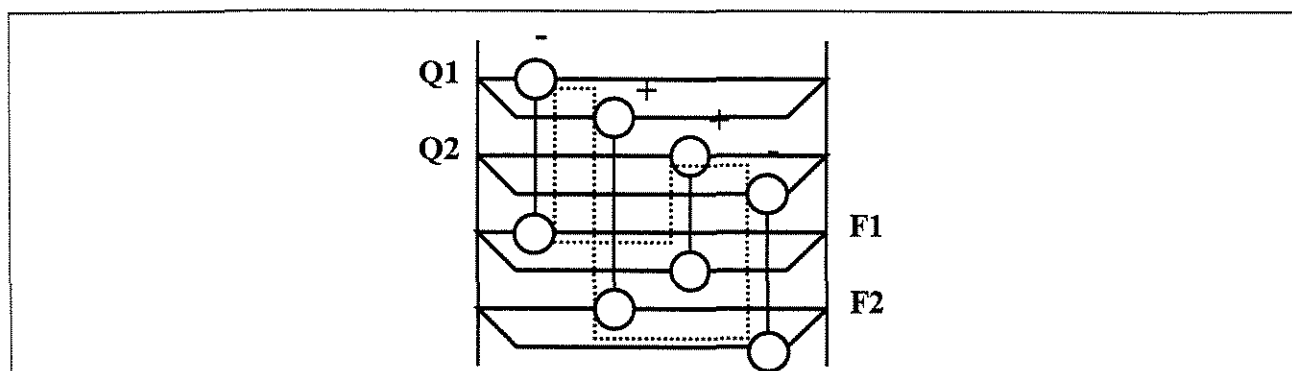
O princípio de transferência de calor vertical estabelece que as correntes quentes de um dado intervalo só podem trocar calor com correntes frias do mesmo intervalo, implicando que o balanço de energia seja satisfeito em cada intervalo. No entanto, para que este balanço não seja violado é necessária a construção de um arranjo que possibilite a transferência de calor de todas as correntes frias, pertencentes a um intervalo, com as correntes quentes, pertencentes a este mesmo intervalo. Isto é possível através da divisão das correntes e da alocação de carga térmica em paralelo entre as correntes, como observado na figura 3.7. Este arranjo é conhecido como *spaghetti network*, e está em concordância com a equação 2.1.

Figura 3.7 – Estrutura *Spaghetti Network*

A representação da área mínima de troca térmica na forma de matriz entre as correntes possibilita a comparação da topologia da malhas existente com a malha de área vertical. Na figura 3.8, são apresentadas duas malhas, a estrutura *spaghetti network* e a estrutura da rede existente. A proposta de SHOKOYA (1992) foi comparar as duas estruturas e minimizar a diferença entre elas, através da flexibilidade existente na distribuição de carga térmica.

Figura 3.8 – Comparação entre a estrutura *Spaghetti* e uma rede existente

Na equação 3.4 desde que o balanço energético no intervalo seja satisfeito a carga térmica alocada entre uma corrente quente e uma corrente fria pode assumir qualquer valor. Portanto, há uma flexibilidade na alocação de carga térmica, de modo que é possível maximizar a compatibilidade entre a matriz de área mínima da matriz de área da rede existente. Uma representação desta flexibilidade é mostrada na figura 3.9, onde o aumento ou a redução da carga térmica em um trocador leva a redistribuição de cargas ao longo da estrutura *spaghetti* de modo a comportar esta alteração.



**Figura 3.9** – Flexibilidade da estrutura *spaghetti network*

Portanto, mesmo respeitando o balanço de energia no intervalo, existe um número infinito de possibilidades de alocação de carga térmica em uma estrutura *spaghetti network*, sendo possível então minimizar as diferenças entre a matriz de área mínima e a matriz de área da rede existente. Em uma rede de pequeno porte, esta minimização pode ser realizada por inspeção. Já no caso de redes de porte industrial, não é possível a minimização da diferença entre as matrizes por inspeção, tornando-se necessária a utilização de técnicas computacionais.

A minimização dos desvios, entre a matriz de área da rede existente e a matriz de área mínima, é um problema de otimização linear. Este problema pode ser formulado da seguinte maneira:

- minimizar os desvios entre a matriz de área mínima e a matriz da rede existente, sujeito as restrições de balanço de energia das correntes em cada intervalo.

O resultado desta minimização é uma terceira matriz, conhecida como matriz de *retrofit*, a qual apresenta os desvios. Estes desvios podem ser positivos, negativos ou nulos, dependendo de como a área existente na rede está alocada em relação ao modelo vertical. Se a área alocada entre

as correntes estiver completamente vertical, então o desvio será nulo. Já se o desvio for positivo, é indicativo que existe mais área alocada que o necessário. Finalmente, se o desvio for negativo indica que aquela região necessita de alocação de área. Neste método, proposto por SHOKOYA (1992), também é possível a realização de uma análise, semelhante a apresentada no trabalho de TJOE (1986), apresentando a vantagem ser possível a realização de *retrofit* abaixo da curva de projeto não realizável pela análise tradicional. Uma vez que o método considera ser possível alocar verticalmente a área existente, é possível utilizar intrinsecamente o aumento da eficiência de área na estimativa de custos.

### 3.4.3 Ferramentas de projeto

Após a estimativa de custos, deve-se realizar o projeto da rede de modo a satisfazer estas estimativas. Uma vez que a estimativa de custos é baseada na transferência de calor vertical, o projeto da rede também deveria seguir uma estratégia de alocação dos trocadores verticalmente. Duas ferramentas foram desenvolvidas por TJOE (1986) para esta alocação de área vertical: o diagrama das forças motrizes (*Driving Force Plot – DFP*) e a análise do problema remanescente (*Remaining Problem Analysis – RPA*).

O diagrama das forças motrizes é derivado do diagrama temperatura entalpia, como pode ser observado na figura 3.10. Extraíndo-se as temperaturas da curva quente e da curva fria para cada descontinuidade da curva composta, pode-se construir um gráfico relacionando a temperatura quente com a temperatura fria, o qual representa um processo com transferência de calor vertical. Então, apenas com os dados de temperatura, representado no *DFP*, é possível determinar se um trocador está bem alocado em relação a um processo com trocadores alocados verticalmente.

Com a utilização do diagrama das forças motrizes, é possível a realização de uma análise qualitativa do posicionamento dos trocadores existentes. No entanto, não é possível quantificar quão eficiente está alocado o trocador. Esta quantificação pode ser obtida através da utilização do *RPA*. A análise do problema remanescente possibilita o cálculo da eficiência de área de um trocador em relação a um posicionamento vertical. Esta baseia-se na alocação do trocador na rede e no cálculo da área mínima remanescente, ou seja, após a alocação do trocador calcula-se a área mínima com as correntes restantes. Se o trocador foi alocado verticalmente sua área somada com a área mínima remanescente será muito próxima da área mínima calculada antes da alocação deste. Já se este trocador não foi bem posicionado na rede, sua área somada com a área mínima

residual será bem maior que a área mínima calculada antes de sua alocação. Esta é sem dúvida uma das grandes contribuições realizada por TJOE (1986). Estas técnicas serão utilizadas para o projeto de redes estudadas neste trabalho, e sua aplicação será demonstrada para o exemplo de um dos casos estudados neste trabalho.

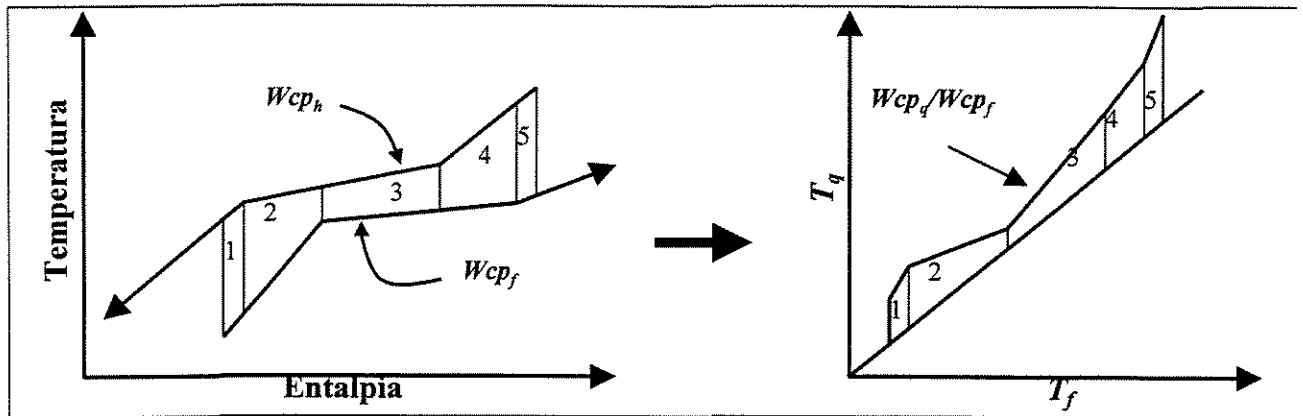


Figura 3.10 – Construção do DFP a partir das curvas compostas

### 3.5. Discussão

Neste capítulo, foram apresentadas técnicas de *retrofit* ligadas a análise *pinch*. As técnicas de *retrofit* desenvolvidas nos dois principais trabalhos citados neste capítulo, estão bem fundamentadas. Em ambos os trabalhos a aplicação das metodologias propostas levam a bons resultados, com projetos muito próximos da estimativa inicial. Em um estudo na literatura, observou-se que poucos trabalhos estão voltados ao *retrofit* de redes, sendo que a maioria presente na literatura faz uma abordagem matemática. Como não é objeto de estudo deste trabalho, métodos de *retrofit* automático, estes foram apenas citados, sem que se entrasse em detalhe sobre que técnicas foram abordadas.

Constatou-se também, que os aspectos operacionais são deixados de lado em *retrofit*. Nenhum dos trabalhos pesquisados na literatura, que utiliza métodos matemáticos, aborda a questão dos aspectos operacionais. Uma única publicação relevante na área, a qual utiliza análise *pinch*, foi apresentada por PANJEH-SHAHI (1992) e será estudada em maiores detalhes no próximo capítulo.



## Capítulo 4 - QUEDA DE PRESSÃO E SUAS IMPLICAÇÕES EM ANÁLISE ENERGÉTICA

No capítulo anterior, foram apresentados os principais métodos baseados em análise *pinch*, presentes na literatura, que realizam análise energética em processos existentes. Uma análise mais aprofundada sobre estes métodos mostra que a maior preocupação, quando estes são utilizados, são os aspectos térmicos dos processos avaliados. No entanto, a questão é se as metas definidas pela análise térmica podem ser satisfeitas do ponto de vista operacional, e mais se estas incorrem em maior custo que aqueles previstos na estimativa inicial.

Neste capítulo, será apresentada a análise energética de um caso com a previsão da área necessária para o *retrofit* da rede. Em seguida, relações entre a área de troca térmica e a queda de pressão serão estudadas mostrando importância dos aspectos operacionais na análise energética. Por fim as principais conclusões da metodologia proposta por PANJEH-SHAHI (1992) será apresentada, a qual considera a queda de pressão em *retrofit* de redes de trocadores de calor.

### 4.1 Análise de processos existentes

O exemplo apresentado ilustrará a aplicação de um método tradicional de *retrofit*, considerando apenas aspectos térmicos em uma rede existente. Será realizada posteriormente uma avaliação do impacto que modificações térmicas poderiam vir a causar nas condições operacionais da rede. O caso estudado foi apresentado em SHOKOYA (1992), tratando-se de uma rede composta de cinco correntes, sendo duas quentes e três frias, como mostrado na figura 4.1.

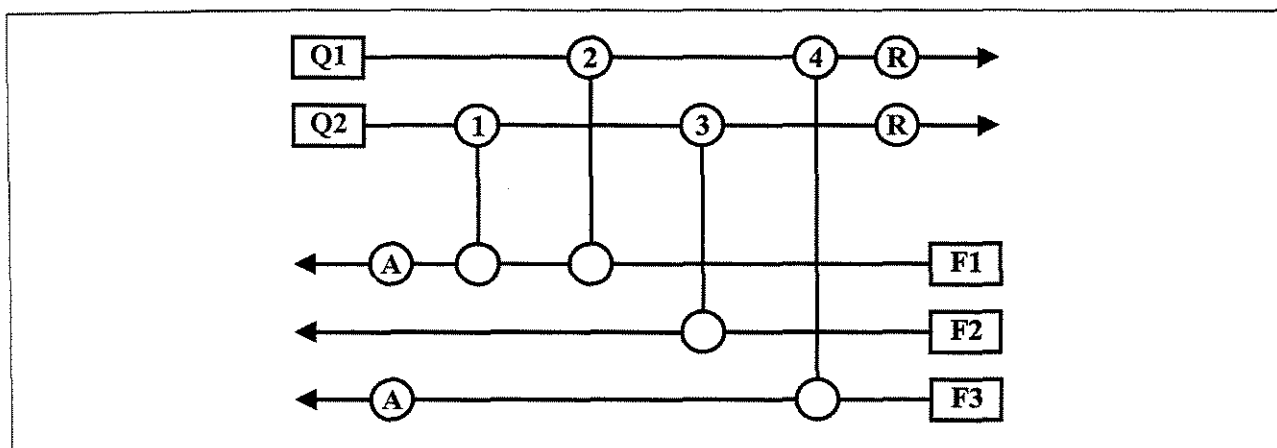


Figura 4.1 – Rede para o caso de cinco correntes

Os dados deste caso são apresentados na tabela 4.1, sendo que a análise energética foi realizada para um  $\Delta T_{min}$  arbitrado de 20 °C. Os dados dos trocadores são apresentados na tabela 4.2, onde a área de troca térmica dos trocadores alocados entre as correntes é necessária para a estimativa de área adicional.

**Tabela 4.1** – Dados das correntes para o caso de cinco correntes

Corrente	$T_{ent}$ [°C]	$T_{sai}$ [°C]	$Wc_p$ [kW/K]	$h$ kW/m <sup>2</sup> °C
Q1	165,0	145,0	148,0	0,45
Q2	240,0	65,0	86,4	0,55
F1	125,0	220,0	139,0	0,35
F2	61,0	192,0	54,6	0,40
F3	70,0	185,0	62,0	0,64

**Tabela 4.2** – Dados dos trocadores para o caso de cinco correntes

Trocador	$A$ [m <sup>2</sup> ]	$Q$ [kW]
1	132,6	2160,0
2	587,6	2560,0
3	724,1	7153,0
4	742,1	4340,0
A1	—	8485,0
A2	—	2790,0
R1	—	3460,0
R2	—	5807,0

#### 4.1.1 Avaliação térmica da rede existente

A rede mostrada na figura 4.1, está operando com um consumo de 11275 kW de utilidade quente e 9267 kW de utilidade fria, com uma área global de troca térmica entre as correntes de 2186,4 m<sup>2</sup>. Pode-se observar, através do cálculo das temperaturas de entrada e saída dos trocadores, que o  $\Delta T_{min}$  da rede é 7,7 °C, ocorrendo no trocador 4. Para este exemplo, um  $\Delta T_{min}$  de 20 °C, representa um consumo mínimo de utilidade quente de 9415,2 kW e um consumo de utilidade fria de 7406,0 kW.

O consumo mínimo de utilidades foi calculado através da implementação em computador de um programa que realizou um balanço energético entre as correntes, baseado no diagrama **Temperatura x Entalpia**. Para este cálculo eram requeridos apenas os dados de temperatura e capacidade térmica das correntes e o  $\Delta T_{min}$  adotado.

#### 4.1.2 Estimativa de área

A estimativa de área de troca térmica, realizada neste exemplo, utilizou a metodologia proposta por SHOKOYA (1992), que aplica técnicas de programação linear para o cálculo da área vertical necessária à rede. Este cálculo foi realizado através da formulação de um modelo de programação linear, o qual foi implementado em linguagem GAMS (1989), utilizando o código de otimização MINOS (1993). O resultado desta otimização é uma matriz de área adicional entre as correntes, como a apresentada na tabela 4.3.

A seqüência da análise de *retrofit* seria a confecção da rede e a comparação da área alocada entre os trocadores com a área estimada inicialmente. No entanto, a preocupação existente é se a rede poderia operar com esta área adicional estimada. Esta questão está diretamente relacionada à queda de pressão disponível na rede, necessitando-se de calcular qual a queda de pressão necessária para esta área adicional. Portanto, há a necessidade de se conhecer qual a relação existente entre a área e a queda de pressão.

**Tabela 4.3** – Área adicional entre as correntes (Coef. Assumidos)

Corrente	F1	F2	F3
Q1		28,7	
Q2	294,5	49,6	222,6

Obs.: Área dada em m<sup>2</sup>

#### 4.2 Relações entre $\Delta P$ e a Área de Troca Térmica

No projeto termo-hidráulico de trocadores, é estabelecido um limite máximo de queda de pressão para cada correntes passando pelo trocador. Este limite, em função dos dados geométricos do trocador, determina a velocidade de escoamento da corrente, e em função desta velocidade calcula-se o coeficiente convectivo de transferência de calor da corrente passando pelo trocador. Comparando esta metodologia de cálculo com aquela realizada na etapa de análise energética verificamos um paradoxo: na estimativa de custos são definidos previamente

coeficientes por correntes, os quais são dados importantíssimos no cálculo da área de troca térmica; já no projeto do trocador a queda de pressão é que passa a ser o dado importantíssimo no cálculo da área de troca térmica. Se o cálculo de área das duas etapas seguem bases diferentes é pouco provável que os resultados sejam compatíveis.

Antes de prosseguir com os estudos de *retrofit*, analisando as limitações térmicas que são impostas a esse problema, é necessário determinar relações quantitativas entre área, queda de pressão e coeficiente convectivo, a fim de utilizar estas informações no desenvolvimento de uma metodologia mais consistente de análise energética.

A velocidade de escoamento de um fluido em um trocador sofre a influência direta de dois fatores: a pressão de bombeamento da corrente e a geometria do trocador de calor. Para uma dada geometria quanto maior for a pressão de bombeamento maior será velocidade de escoamento. Esta relação pode ser representada pela equação:

$$\Delta P = K_{p1} L V^{2-n} \quad \text{Eq. 4.1}$$

onde  $L$  é o comprimento do trocador,  $K_{p1}$  uma constante de proporcionalidade e  $V$  a velocidade de escoamento. O comprimento do trocador de calor afeta o fluxo volumétrico ( $F_v$ ), bem como a área de troca térmica ( $A$ ) e a velocidade de escoamento do fluido ( $V$ ) pela relação:

$$L = K_{p2} \frac{A \cdot V}{F_v} \quad \text{Eq. 4.2}$$

A constante  $K_{p2}$  tem dimensões de comprimento e depende de fatores geométricos do trocador.

Nas equações de cálculo do número de Nusselt, tanto para o casco como para o tubo, qualquer que seja o regime de escoamento a relação entre o coeficiente convectivo de transferência de calor e a velocidade de escoamento será:

$$h = K_{p3} \cdot V^m \quad \text{Eq. 4.3}$$

O expoente  $m$  da c

correlação utilizada, esta diretamente ligado ao regime de escoamento do fluido e se o fluido passa no tubo ou no casco.

Se as equações 4.1 a 4.3 forem combinadas tem-se:

$$\Delta P = \frac{K_{p4}}{V_0} A \cdot h^{\frac{3-n}{m}} \quad \text{Eq. 4.4}$$

Nesta equação,  $K_{p4}$  é função apenas de propriedades físicas e de alguns parâmetros geométricos do trocador, que serão estudados mais detalhadamente nos próximos tópicos. A equação 4.4

estabelece uma relação geral entre área,  $\Delta P$  e o coeficiente convectivo da corrente, a qual pode ser aplicada a qualquer tipo de trocador de calor, desde que estejam disponíveis os expoentes de Reynolds nas equações de transferência de calor. A grande importância desta equação é o estabelecimento da maneira como uma grandeza influencia a outra.

A equação 4.4 pode também ser deduzida para casos particulares, como é o caso dos trocadores casco-tubo. Duas expressões podem ser extraídas da combinação de equações que relacionam área, coeficiente convectivo e queda de pressão, uma para o tubo e uma segunda para o casco. A expressão para o tubo é uma expressão geral, enquanto a expressão para o casco é dependente do método de cálculo dos coeficientes convectivos para este.

JEGEDE (1990), deduziu a equação para o tubo em seu trabalho, sendo esta equação dada por:

$$\Delta P_t = K_{pt} A h_t^{3,5} \quad \text{Eq. 4.5}$$

onde  $\Delta P_t$  é a queda de pressão disponível na corrente,  $K_{pt}$  a constante da queda pressão para o fluido passando no tubo,  $A$  a área de troca térmica e  $h_t$  o coeficiente convectivo para o lado do tubo.

A constante de queda de pressão do lado do tubo é dada por:

$$K_{pt} = 0,092 \frac{\rho}{D_{it}} \left( \frac{\rho D_{it}}{\mu} \right)^{-0,2} \frac{D_{it}^2}{4 F v_t D_{et}} \left( \frac{1}{0,023 \frac{\kappa}{D_{it}} Pr^{1/3} \left( \frac{\rho D_{it}}{\mu} \right)^{0,8}} \right)^{3,5} \quad \text{Eq. 4.6}$$

$K_{pt}$  é função das propriedades:

- Massa específica ( $\rho$ ) [kg/m<sup>3</sup>];
- Viscosidade ( $\mu$ ) [N.s/m<sup>2</sup>];
- Condutividade ( $\kappa$ ) [W/m °C];
- Calor específico ( $c_p$ ) [J/kg °C].

Esta constante depende também do fluxo volumétrico no tubo ( $F v_t$ ) dado em m<sup>3</sup>/h, do diâmetro interno do tubo ( $D_{it}$ ) dado em mm e do diâmetro externo do tubo ( $D_{et}$ ) dado em mm, parâmetros geralmente fixados antes do projeto da rede.

A equação para o cálculo da queda de pressão do lado do casco depende do tipo de método de cálculo que será utilizado. Neste trabalho, tem-se por finalidade fazer um estudo de como as

limitações operacionais afetam a análise energética. Para efeito deste estudo, o método de KERN (1950) foi considerado, já que sua utilização é simples e seus resultados são conservativos.

A equação obtida para o método Kern é:

$$\Delta P_c = K_{pc} A h_c^{5,1} \quad \text{Eq. 4.7}$$

onde  $\Delta P_c$  é a queda de pressão do lado do casco,  $K_{pc}$  a constante da queda de pressão do lado casco e  $h_c$  o coeficiente convectivo do lado do casco. A constante  $K_{pc}$  é dada por:

$$K_{pc} = \frac{1,539 \left( \frac{\mu}{D_{eq}} \right)^3 E_{et} (E_{et} - D_{et})}{\rho D_{eq} \pi^2 D_{et} Fm_c} \left( \frac{l}{0,36 \frac{\kappa}{D_{eq}} Pr^{1/3}} \right)^{5,1} \quad \text{Eq. 4.8}$$

onde  $E_{et}$  é o espaçamento entre os tubos dado em mm,  $D_{eq}$  é o diâmetro equivalente dado em mm,  $D_{et}$  o diâmetro externo do tubo dado em mm e  $Fm_c$  o fluxo mássico no casco dado em kg/h.

A equação da constante da queda de pressão do lado do casco é função:

- das propriedades físicas da corrente;
- do fluxo volumétrico da corrente;
- do diâmetro equivalente.

O diâmetro equivalente é calculado a partir do diâmetro externo do tubo ( $D_{et}$ ), do espaçamento entre os tubos ( $E_{et}$ ) e do arranjo entre os tubos.

Como pode ser observado neste tópico a queda de pressão esta intimamente relacionada à área de troca térmica em uma rede. Portanto as limitações de queda de pressão em uma rede não podem ser desconsideradas. As equações de queda de pressão possibilitam uma nova abordagem no estudo de *retrofit*, onde as limitações de queda de pressão podem ser utilizadas como restrições operacionais em estudos de *retrofit*.

PANJEH-SHAHI (1992) realizou um estudo considerando as equações de queda de pressão nas correntes em *retrofit* de redes. Este estudo baseava-se na utilização do método Alpha, com uma análise prévia do desempenho da rede, a partir da queda de pressão existente no processo. Com os dados de queda de pressão do processo e as propriedades físicas das correntes, eram calculados os coeficientes que seriam utilizados pelas correntes na etapa de *retrofit*. Uma conclusão importante deste estudo foi: só é possível a realização do *retrofit* em uma rede se houver disponibilidade de queda de pressão.

## Capítulo 5 - MATRIZ DE ÁREA COM LIMITAÇÕES DE QUEDA DE PRESSÃO – UMA NOVA ABORDAGEM

### 5.1. Introdução

Como foi visto no capítulo anterior, os aspectos relacionados à queda de pressão das correntes tem papel relevante no desenvolvimento de técnicas que realizem a predição precisa de custos em redes de trocadores de calor. É evidente que as considerações admitidas até então, de coeficientes de troca térmica assumidos, podem levar a uma análise energética imprecisa, inviabilizando a estimativa de custos realizada antes do projeto da rede. Portanto, a análise considerando limitações decorrentes das restrições de queda de pressão desenvolvido por PANJEH-SHAHI (1992) e apresentado no capítulo anterior, conduz a resultados mais concordantes entre a estimativa e o projeto detalhado dos equipamentos. No entanto, o princípio derivado de TJOE (1986) e utilizado por PANJEH-SHAHI (1992), em que toda a área de troca térmica está alocada com a mesma eficiência de área é menos preciso que o proposto por SHOKOYA (1992). Pode-se então idealizar uma metodologia em que as relações entre área, queda da pressão e coeficientes convectivos sejam utilizada com o princípio que diferentes regiões da rede exibem diferentes eficiência de área. No entanto como será visto mais a frente não é possível associar diretamente estes dois conceitos, simplesmente associando a proposta de PANJEH-SHAHI (1992) com a proposta de SHOKOYA (1992).

### 5.2. Disponibilidade de queda de pressão em processos

A consideração da limitações de queda de pressão nas correntes exige uma maneira nova de abordar os problemas de *retrofit*. Como a adição de área em uma rede está diretamente ligado à necessidade de queda de pressão disponível nas correntes, se esta não existir não será possível a integração energética da rede.

Existem três possibilidades de disponibilizar a queda de pressão em uma rede:

- Otimizando a utilização da queda de pressão nos trocadores existentes;
- Aproveitar a folga de  $\Delta P$  do sistema de bombeamento e
- Trocar as bombas existentes por bombas mais potentes.

A disponibilização de queda de pressão através da troca do sistema de bombeamento, oneraria os custos de *retrofit* da rede. Esta alternativa torna-se interessante se o sistema de

bombeamento esta operando no limite, e a inclusão de novas bombas for prevista na estimativa de custos, situação que não ocorre na análise energética tradicional. No entanto, e mais interessante economicamente se existe queda de pressão disponível no processo, sendo que a aquisição de novas bombas só se daria após o aproveitamento de toda a capacidade existente.

A análise baseada na utilização da queda de pressão disponível no processo, recai então sobre as duas primeiras alternativas citadas, ou seja, a utilização da queda de pressão disponível na rede e a utilização da folga do sistema de bombeamento. A primeira alternativa, proposta no trabalho de PANJEH-SHAHI (1992), onde utilizando-se uma análise do problema remanescente (*RPA*) baseado em  $\Delta P$  é possível avaliar a eficiência dos trocadores em relação à utilização de queda de pressão do sistema, com a proposição de basicamente duas modificações:

- arranjo em paralelo dos trocadores ao invés de em série e
- troca do lado de escoamento dos fluidos.

A aplicação desta possibilidade está restrita a situações particulares em que a eficiência de utilização da queda de pressão é baixa, sendo portanto necessária o rearranjo de trocadores. Mas mesmo em alguns sistemas com baixa eficiência não é possível o rearranjo dos trocadores para o melhor aproveitamento da queda de pressão das correntes. Por exemplo, em sistemas em que o fluido necessariamente tem que passar por um dos lados do trocador, por razões de segurança; uma outra situação seria quando os fluidos tem uma elevada deposição de sólidos nos trocadores e a colocação de trocadores em paralelo ao invés de em série aumentaria ainda mais esta deposição, uma vez que a velocidade de escoamento dos fluidos seria reduzida.

A segunda alternativa, aproveitar a folga de  $\Delta P$  do sistema de bombeamento, seria bem mais plausível de ser utilizada, pois geralmente as bombas adquiridas são padronizadas e sempre com capacidade maior que a necessária nos cálculos de projeto. Portanto com raras exceções o sistemas de bombeamento adquirido para um determinado processo apresenta folgas necessitando de válvulas para “consumir” a queda de pressão excedente. Isto pode ser observado na Figura 5.1, onde apresenta-se uma curva característica de uma bomba, podendo-se observar dois pontos distintos, o de capacidade máxima da bomba, representado por *cm* no gráfico, e o de ponto de operação da bomba, representado por *ob*. Como a bomba tem que operar com uma vazão menor que a sua capacidade será preciso uma válvula para controlar a sua vazão, mas se mais área for alocada na rede as condições operacionais terão que ser alteradas, com uma maior abertura da válvula, ou seja, o ponto *ob* se aproximara do ponto *cm*.



O presente trabalho, baseou-se nesta ultima hipótese, utilizando o excedente do sistema de bombeamento para a alocação de nova área. Esta abordagem apresenta vantagens se comparada com a metodologia proposta por PANJEH-SHAHI (1992), como a queda de pressão disponível das correntes é conhecida antes do projeto da rede, pode-se realizar uma estimativa de custos considerando esta. Na metodologia proposta por PANJEH-SHAHI (1992) só seria possível adicionar área após o reposicionamento dos trocadores.

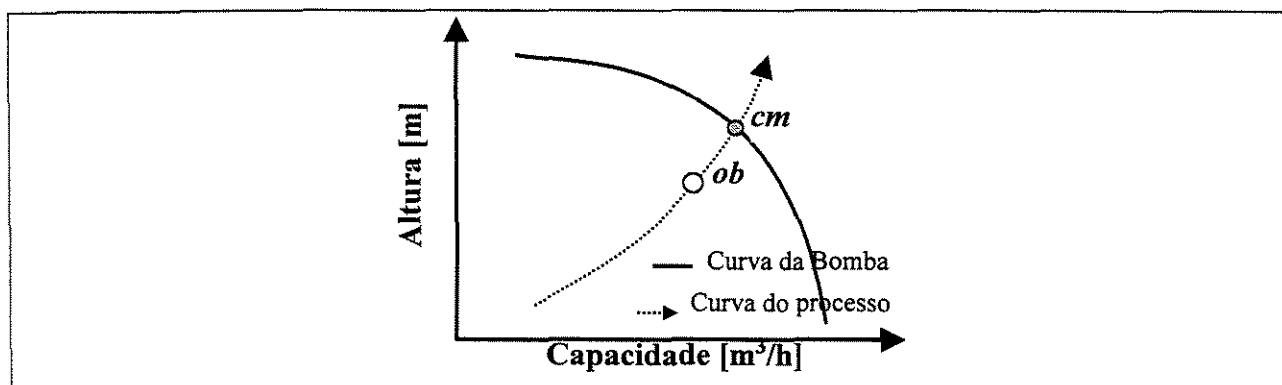


Figura 5.1 – Gráfico de uma curva de bomba

### 5.3. Considerações a respeito de modelos não lineares

A metodologia de *retrofit* proposta por PANJEH-SHAHI (1992), apresentada no capítulo anterior, avalia a possibilidade de rearranjo nos trocadores de modo a disponibilizar queda de pressão. Nesta metodologia, os coeficientes de transferência de calor das correntes são obtidos a partir da queda de pressão dos trocadores existentes e utilizados na estimativa de área. Esta metodologia apresenta a vantagem de não necessitar de métodos matemáticos complexos, como os métodos de otimização não linear. No entanto, não é possível definir quanto de queda de pressão pode ser disponibilizado, pois não é possível prever a queda de pressão das correntes antes do reposicionamento dos trocadores, esta só será definida no decorrer do projeto. Já no caso de *retrofit*, baseado na folga de operação do sistema de bombeamento, é possível definir o quanto de queda de pressão está disponível na rede antes do reposicionamento dos trocadores. Em contrapartida será necessária a utilização de métodos de otimização sofisticados.

Conhecendo-se a disponibilidade de queda de pressão de cada corrente pode-se então estimar os coeficientes que seriam utilizados na etapa de projeto detalhado e a área adicional

necessária para um dado consumo de energia. Esta estimativa pode ser realizada por intermédio de uma modelagem derivada da matriz de área, caracterizando-se por ser um modelo não linear.

A resolução de modelos não linear está entre os problemas de otimização mais difíceis de ser resolvidos. Em um modelo não linear deve-se observar dois fatores fundamentais para o sucesso da otimização:

- a natureza da função objetivo e
- a natureza das restrições.

As características não lineares nos modelos podem ou ser através das restrições, através da função objetivo, ou ainda através de ambas. O caso mais simples é quando todas as não linearidades do modelo estão na função objetivo. Já o caso mais complicado é quando tanto função objetivo como as restrições são não lineares. Neste caso, há a necessidade da aplicação de métodos numéricos sofisticados

Os modelos não lineares estão entre os mais complicados de serem resolvidos, pois as não linearidades, tanto da função objetivo como das restrições, podem criar superfícies de busca da solução altamente irregulares. Nos modelos não lineares, para que seja possível a sua solução, necessita-se de um bom escalonamento e com uma superfície de busca bem determinada, com limites, inferior e superior, para todas as variáveis. Outro aspecto que deve ser observado em trabalhos de otimização é a adequação do tipo de modelo à ferramenta matemática utilizada para a sua solução.

Durante o desenvolvimento do trabalho, três algoritmos de matemáticos de otimização forma utilizadas, considerados ao mais eficientes na resolução de modelos matemáticos não lineares. No entanto, cada um deles é específica para tipos de modelos particulares. Não é objetivo deste trabalho entrar no mérito do mecanismo que cada um deste método utiliza para a resolução dos modelos não lineares. Portanto, a abordagem aqui apresentada de cada método será a mais superficial possível.

Para a solução de problemas não lineares de grande porte, um dos algoritmos mais utilizado é o MINOS (1993). No entanto, este algoritmo é mais eficiente em problemas em que todas as não linearidades do modelo estão na função objetivo. Como será observada na formulação do modelo sugerido, a função objetivo é linear enquanto alguma das restrições apresentam não linearidades. Portanto, este algoritmo apresenta dificuldades para a resolução do modelo.

Outro algoritmo muito eficiente na resolução de modelos não lineares é o SQP, que acompanha a biblioteca numérica NAG (1991). No entanto, este algoritmo não é adequado para problemas que gerem matrizes com grande quantidade de zeros (matrizes esparsas) para a sua resolução do modelo. Isto ocorre em modelos da natureza do sugerido, uma vez que este envolve um grande número de equações com uma grande quantidade de variáveis. Por fim, o último algoritmo apresentado na literatura para a resolução de modelos não lineares é o CONOPT. Este algoritmo é adequado para a solução de modelos que podem apresentar grandes não linearidades, tanto nas restrições como na função objetivo, além de tratar problemas que podem gerar matrizes esparsa. Portanto, o algoritmo adequa-se perfeitamente para a resolução do modelo proposto. Testes realizados com os três algoritmos mostraram total concordância com estudos apresentados na literatura. Enquanto o CONOPT resolveu rapidamente, tanto casos pequenos quanto grandes, com o modelo formulado, o MINOS (1993) levou uma grande quantidade de iterações para resolver casos pequenos e não resolveu os casos grandes. Já com o SQP não foi possível nem resolver casos pequenos nem grandes.

No presente trabalho, utilizou-se o CONOPT, pois para que o MINOS pudesse ser utilizado com êxito seria necessário transferir todas as não linearidades para a função objetivo. No entanto, o número de equações não lineares geradas no modelo era considerável, não sendo possível transferir todas as não linearidades para a função objetivo e tornando inviável a utilização do MINOS.

#### ***5.4. Matriz de área original com as equações de queda de pressão – É possível?***

A metodologia da matriz de área já foi apresentada no terceiro capítulo, sendo fundamental no desenvolvimento do presente trabalho. O resultado do estudo de SHOKOYA (1992) é o desenvolvimento de um modelo linear para a predição da área mínima a ser adicionada à rede, apresentando grande concordância com o projeto conceitual. Em princípio, para que sejam consideradas as limitações de queda de pressão nesta modelagem seria necessário apenas a inclusão das equações de queda de pressão das correntes, agregando características não lineares ao modelo e tornando-o mais complexo de ser resolvido. Este tipo de abordagem foi sugerido por SHOKOYA (1992) como uma sugestão de trabalho futuro e foi um dos alvos de estudo do presente trabalho.

O modelo em discussão é derivado daquele proposto por SHOKOYA (1992), sendo que todas as considerações apresentadas naquele trabalho também são adotadas aqui. A consideração

mais importante é a da garantia de área mínima, através da transferência de calor vertical entre as correntes, com a flexibilidade da distribuição de carga térmica entre as correntes em cada intervalo, permitindo maximizar a compatibilidade entre a matriz de área da rede existente com a matriz de área mínima. Para o completo desenvolvimento deste modelo há a necessidade da inclusão das equações de queda de pressão das correntes, passando-se a calcular então os coeficientes convectivos das correntes, condicionados ao limite de queda de pressão disponível para cada corrente.

Pode-se apresentar o modelo como segue:

- minimizar a área adicional de uma rede de trocadores de calor para uma dada recuperação de energia, sujeita às restrições de balanço de energia, por corrente e por intervalo, juntamente com equações limitando a queda de pressão das correntes e equações que considerem a distribuição de área da rede existente.

#### 5.4.1 Implicações da modelagem sugerida

A aplicação de uma modelagem proposta, semelhantemente àquela proposta por SHOKOYA (1992) e apresentada no terceiro capítulo, retornaria uma matriz com área vertical que deveria ser adicionada entre as correntes quentes e frias e os coeficientes convectivos de transferência de calor que deveriam ser utilizados. A metodologia proposta por SHOKOYA (1992) baseia-se na minimização dos desvios entre as duas matrizes. No entanto, estas matrizes não podem ser comparadas, a não ser que os trocadores existentes assumissem os novos valores calculados dos coeficientes. Além disso a estrutura *spaghetti network* tradicional diferencia a área nova da área existente, pois a finalidade é justamente maximizar a compatibilidade entre as duas. Portanto, não é possível, utilizar a metodologia da matriz de área diretamente com as equações de queda de pressão, sendo necessário uma análise mais profunda.

#### 5.5. Modelo da matriz de área modificado

Para que a estimativa seja mais realista e precisa é necessário o desenvolvimento de um modelo mais elaborado, mas este modelo ainda deve basear-se na transferência de calor vertical e obviamente satisfazer os balanços energéticos das correntes. Portanto, a estrutura *spaghetti network* não pode ser abandonada, e mais este modelo deve ser alterado de modo a absorver as características dos problemas abordados no presente trabalho.

### 5.5.1 *Spaghetti Network* e suas Implicações

O modelo de transferência vertical baseia-se na divisão das correntes em intervalos de entalpia. Este modelo gera uma estrutura conhecida na literatura como “*spaghetti network*”, e que é muito simples de ser implementada. Em situações mais realistas este modelo apresenta limitações, uma vez que o modelo prevê a divisão de correntes, sendo que esta raramente ocorre em processos reais. Outra limitação que é consequência deste modelo é que a velocidade de escoamento é uma função direta da vazão, e mudanças na vazão ocasionam mudanças na velocidade de escoamento, que por sua vez alteram os valores dos coeficientes convectivos das correntes. Entretanto, os resultados de área estimados por este modelo para a análise energética tradicional, que não considera queda de pressão, não podem ser comparados com os resultados de projeto detalhado, já que as bases de cálculo de área são diferentes. Se ambos os cálculos, tanto os de estimativa quanto o de projeto detalhado, utilizarem a mesma base de cálculo, isto é, disponibilidade de  $\Delta P$ , então pode-se avaliar a validade do modelo *spaghetti network*.

Como foi visto no tópico anterior, a junção da metodologia da matriz de área com as equações de  $\Delta P$ , não pode ser aplicada aos problemas de *retrofit*, já que os coeficientes dos trocadores existentes tem que ser preservado, por razões óbvias. Isto conduz ao desenvolvimento de um novo modelo que diferencie a área adicional, estimada, da área existente, já definida a priori. Utilizando como base o princípio de transferência de calor vertical, é possível o desenvolvimento de um modelo baseado na estrutura *spaghetti network*, onde a carga térmica alocada pelos trocadores existentes é diferenciada da carga térmica alocada para trocadores novos.

Tomando como base a estrutura *spaghetti network*, duas possibilidades de alocação de carga térmica adicional podem ser adotadas em relação a carga térmica existente na rede: em série ou em paralelo. Se o modelo adotado for o de alocação de carga térmica em série, a carga térmica adicional ainda pode se localizada ou à direita ou à esquerda, gerando uma grande quantidade de possibilidades de alocação de carga térmica. O desenvolvimento do modelo baseado na alocação de carga térmica é relativamente complexo de ser implementado, pois a escolha da localização da carga térmica adicional deve realizada pelo otimizador, uma vez que seu posicionamento pode alterar o cálculo da área estimada. Além disso é necessário calcular a temperatura intermediária, na corrente dentro do intervalo, entre a carga térmica adicional e a carga térmica já alocada na rede. Este modelo ainda apresenta a desvantagem de não ser

completamente vertical, pois o  $\Delta T$  calculado com as temperaturas intermediárias pode violar o  $\Delta T_{min}$  adotado para a rede. O esquema de estrutura de *spaghetti network* modificado para este modelo é mostrado na Figura 5.2(a), Figura 5.2(b) e Figura 5.2(c).

A outra forma de alocação de carga térmica é mostrada na Figura 5.3. Este modelo de alocação é completamente vertical, pois não há a possibilidade de ocorrer violações no  $\Delta T_{min}$  adotado para a rede. O modelo é mais simples de ser implementado, pois as temperaturas já estão definidas através da divisão em intervalos de entalpia, não sendo necessário nenhum cálculo adicional, muito menos a determinação do posicionamento da carga térmica adicional. No entanto, este modelo sofre mais com o problema de divisão de correntes que o modelo em série, mas este problema de divisão de corrente pode ser compensado pelo caráter não vertical que o modelo em série apresenta.

Portanto, optou-se pela utilização do modelo em paralelo para a estimativa de área através da estrutura *spaghetti network*, pois mesmo sendo mais simples que o modelo em série este modelo apresenta grande complexidade para ser resolvido, e também porque este modelo utiliza verdadeiramente o conceito de transferência de calor vertical, adotado para o cálculo de área mínima.

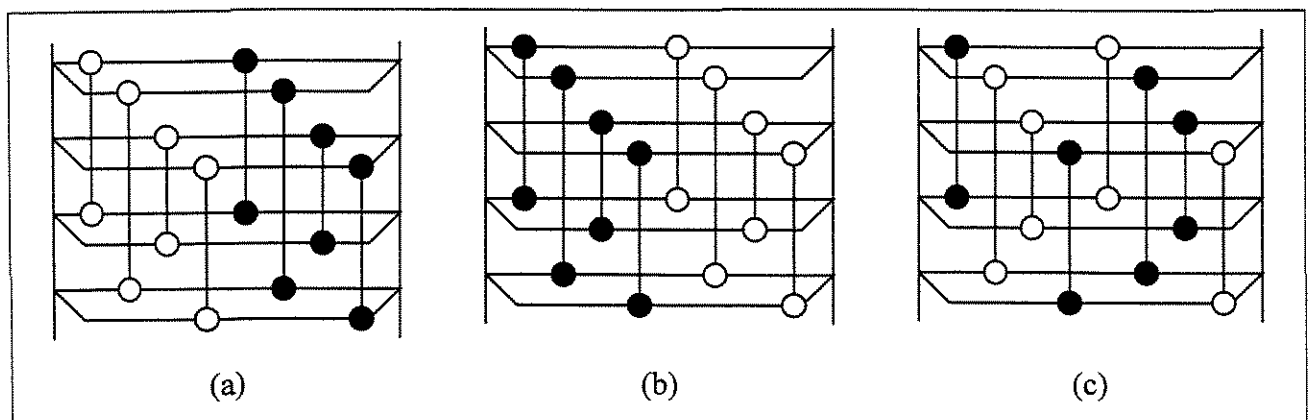
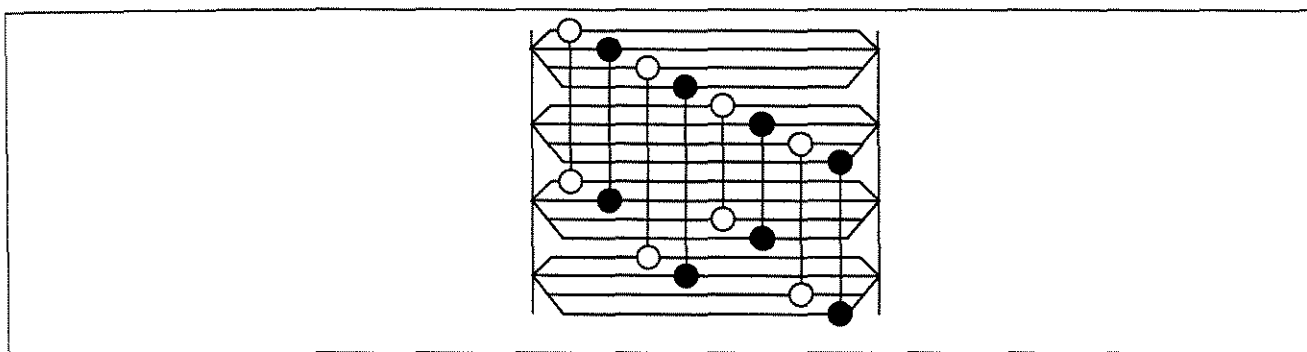


Figura 5.2 - Esquemas de estrutura *spaghetti network* modificada em série para estimativa de área



**Figura 5.3** - Esquemas de estrutura *spaghetti network* modificada em paralelo para estimativa de área

O ***spaghetti network* modificado** é o passo mais importante no desenvolvimento do modelo de predição de área em casos de *retrofit* que utiliza a disponibilidade de queda de pressão previamente estabelecida, pois este apresenta a grande vantagem de ser possível diferenciar a carga térmica alocada pelos trocados existentes da carga térmica alocada para os trocadores novos.

### 5.5.2 Algoritmo da matriz de área modificado

Definida a estrutura do modelo a ser utilizada, pode-se propor então um algoritmo para a otimização que utiliza informações da distribuição da malha de troca térmica entre as correntes na predição da área associada às restrições de queda de pressão. Neste algoritmo, é necessária a definição dos parâmetros necessários para os cálculos, bem como quais os resultados que retornarão da otimização.

A Figura 5.4 apresenta um esboço bem simplificado do algoritmo desenvolvido para a predição, não só de área, mas também de coeficientes convectivos e velocidades de escoamento das correntes. Uma vez estabelecido o consumo mínimo de utilidades e com informações das correntes pode-se calcular os intervalos de entalpia para a rede, sendo que estas informações serão utilizadas na fase otimização. As constantes de queda de pressão são calculadas através das equações 4.6 e 4.8, as quais serão utilizadas nas equações de  $\Delta P$ , a partir de alguns dados geométricos pré-estabelecidos para os trocadores e das propriedades físicas das correntes. Além destes dados ainda são necessárias a distribuição de área entre as correntes e a disponibilidade de queda de pressão para cada corrente.

O modelo de otimização pode então ser executado em um código de otimização não linear, retornando a distribuição de área adicional, os coeficientes convectivos que devem ser utilizados nos trocadores novos, além da velocidade de escoamento a ser utilizada, a qual está limitada entre valores máximos e mínimos. O modelo será melhor detalhado no próximo tópico, onde as equações serão apresentadas e as limitações físicas das variáveis serão abordadas.

O algoritmo aqui proposto pode ser facilmente adaptável para o levantamento da curva de *retrofit* de um processo, fundamental para a análise de viabilidade. Este será um assunto estudado mais profundamente no próximo capítulo. Neste ponto do trabalho o objetivo foi o estudo do algoritmo, sua implementação e as limitações de ordem prática relacionadas ao modelo, sendo deixada de lado a análise econômica.

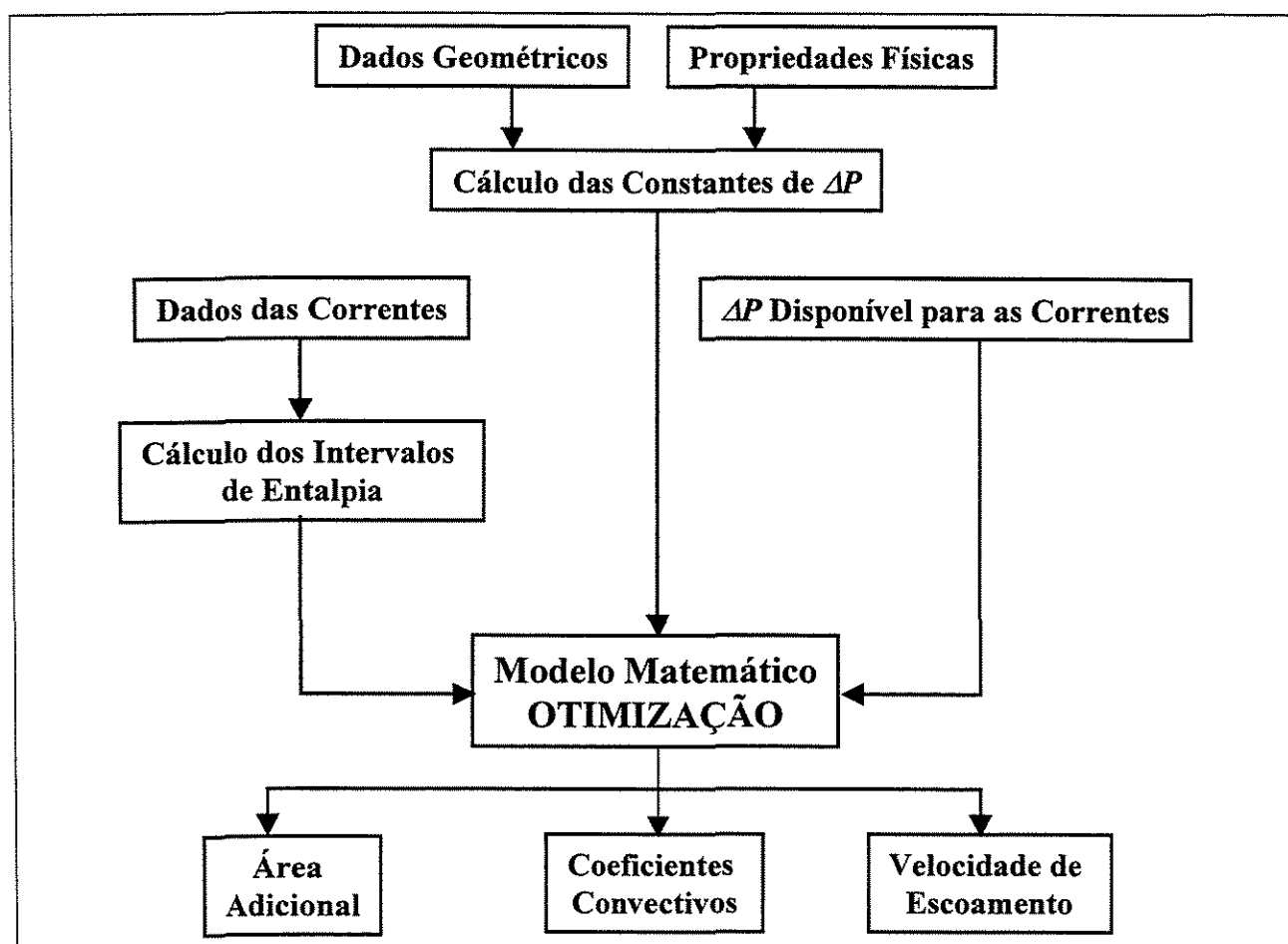


Figura 5.4 - Esquema de otimização

### 5.5.3 Equações do modelo

O modelo matemático desenvolvido para a estimativa de área adicional considerando as



restrições de queda de pressão, envolve o balanço de energia para cada corrente em cada intervalo e equação do projeto térmico, bem como as equação para o cálculo da queda de pressão de cada corrente. Deve-se considerar ainda a restrição que a área adicional a ser otimizada deve ser positiva.

A equação do balanço de energia para as correntes quentes é dada por:

$$\Delta H_{i,k} = \sum_{j=1}^n (Q_{i,j,k}^{ex} + Q_{i,j,k}^{nov}) \quad \text{Eq. 5.1}$$

onde,  $\Delta H_{i,k}$  é a entalpia da corrente quente  $i$  no intervalo  $k$ ,  $Q_{i,j,k}^{ex}$  é a carga térmica entre a corrente quente  $i$  e a corrente fria  $j$  no intervalo  $k$  para os trocadores existentes,  $Q_{i,j,k}^{nov}$  é a carga térmica entre a corrente quente  $i$  e a corrente fria  $j$  no intervalo  $k$  para a nova área a ser alocada e  $n$  é o número de correntes frias presentes no problema. De forma análoga, a equação do balanço de energia para as correntes frias é:

$$\Delta H_{j,k} = \sum_{i=1}^m (Q_{i,j,k}^{ex} + Q_{i,j,k}^{nov}) \quad \text{Eq. 5.2}$$

onde,  $\Delta H_{j,k}$  é a entalpia da corrente fria  $j$  no intervalo  $k$  e  $m$  é o número de correntes quentes.

A área existente entre as correntes deve ser satisfeita pela equações de projeto térmico, dada por:

$$A_{i,j}^{ex} = \left( \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_j} \right) \sum_{k=1}^w \frac{Q_{i,j,k}^{ex}}{\Delta T_{ln,k}} \quad \text{Eq. 5.3}$$

onde,  $A_{i,j}^{ex}$  é a área existente entre a corrente quente  $i$  e a corrente fria  $j$ ,  $h_i$  é o coeficiente convectivo de transferência da corrente quente  $i$ , para os trocadores existentes,  $h_j$  é o coeficiente da corrente fria  $j$ , também para os trocadores existentes, e  $\Delta T_{ln,k}$  é a média logarítmica de diferença de temperatura no intervalo  $k$ .

Como o balanço de energia deve ser satisfeito, é perfeitamente possível a ocorrência de

cargas térmicas adicionais negativas, mas somente os valores positivos interessam para a estimativa de área. Portanto, é necessária uma restrição que atribua os valores positivos a uma variável. Esta restrição é:

$$Q_{i,j,k}^{pos} = \max(0, Q_{i,j,k}^{nov}) \quad \text{Eq. 5.4}$$

onde  $Q_{i,j,k}^{pos}$  é a carga térmica positiva entre as correntes  $i$  e  $j$ .

A equação de projeto térmico é novamente utilizada, desta vez para o cálculo da área a ser adicionada, dada por:

$$A_{i,j}^{nov} = \left( \frac{1}{h_i^{nov}} + \frac{1}{h_j^{nov}} \right) \sum_{k=1}^w \frac{Q_{i,j,k}^{pos}}{\Delta T_{lm,k}} \quad \text{Eq. 5.5}$$

sendo,  $A_{i,j}^{nov}$  a área adicional entre a corrente quente  $i$  e a corrente fria  $j$ ,  $h_i^{nov}$  o coeficiente convectivo da corrente quente  $i$  para os novos trocadores e  $h_j^{nov}$  o coeficiente convectivo da corrente fria  $j$ , também para os novos trocadores.

As relações entre queda de pressão das correntes quentes, desvio de área de troca térmica e coeficiente são dadas por:

$$\Delta P_i = K_i (h_i^{nov})^{5,1} \sum_{j=1}^n A_{i,j}^{nov} \quad \text{Eq. 5.6}$$

onde  $K_i$  é a constante da queda de pressão para a corrente quente  $i$ .

Queda de pressão da corrente fria:

$$\Delta P_j = K_j (h_j^{nov})^{3,6} \sum_{i=1}^n A_{i,j}^{nov} \quad \text{Eq. 5.7}$$

onde  $K_j$  é a constante da queda de pressão para a corrente  $j$ .

As equações 5.1 a 5.7 são restrições do modelo, sendo que a função objetivo é dada por:

$$obj = \min \sum_i \sum_j A_{i,j}^{nov} \quad \text{Eq. 5.8}$$

A formulação deste modelo garante que toda queda de pressão disponível nas correntes será utilizada, pois deseja-se minimizar a área de troca térmica. No entanto, as condições operacionais devem ser respeitadas, e portanto nem sempre será possível utilizar toda a queda de pressão disponível, uma vez que as velocidades de escoamento nos trocadores devem estar entre valores máximos e mínimos de operação. Para garantir que estes valores não serão violados deve-se adicionar ao modelo, equações que calculam a velocidade de escoamento, bem como as equações que limitam os valores das velocidades. As equações para o cálculo da velocidade de escoamento para as correntes frias são dadas por:

$$V_i = \left( \frac{h_i^{nov}}{Kv_i} \right)^{0,8} \quad \text{Eq. 5.9}$$

$$V_i \geq V_{i(min)} \quad \text{Eq. 5.10}$$

$$V_i \leq V_{i(max)} \quad \text{Eq. 5.11}$$

onde  $V_i$  é a velocidade de escoamento da corrente quente  $i$  e  $Kv_i$  a constante da equação que é função das propriedades físicas da corrente  $i$  e dos dados geométricos do trocador. Esta velocidade  $V_i$  é limitada pela velocidade máxima de operação  $V_{i(max)}$  e pela velocidade mínima de operação  $V_{i(min)}$ . De forma análoga, para as correntes quentes as equações são dadas por:

$$V_j = \left( \frac{h_j^{nov}}{Kv_j} \right)^{0,55} \quad \text{Eq. 5.12}$$

$$V_j \geq V_{j(min)} \quad \text{Eq. 5.13}$$

$$V_j \leq V_{j(max)} \quad \text{Eq. 5.14}$$

onde  $V_j$  é a velocidade de escoamento da corrente fria  $j$ , limitada pelas velocidades máxima e mínima  $V_{j(max)}$  e  $V_{j(min)}$ , respectivamente e  $Kv_j$  é a constante da equação, que assim como no caso

das correntes frias é função das propriedades físicas e dos dados geométricos do trocador.

Este modelo foi implementado utilizando o modelador GAMS (1989), juntamente com o código de otimização CONOPT. Outros códigos de otimização foram utilizados, como o MINOS (1993) e a NAG (1991), mas não foi possível a obtenção de solução, devido a grande quantidade de zeros existentes nas matrizes geradas para o problema (matrizes esparsas), e alta não linearidade das equações do modelo.

### **5.6. Considerações de projeto de redes com queda de pressão**

No projeto de redes baseado nos coeficientes constantes não há a necessidade de satisfazer parâmetros operacionais do processo. Já no caso da inclusão da queda de pressão tais parâmetros devem ser considerados, pois tanto os limites máximos de queda de pressão devem ser considerados, como as velocidades máxima e mínima, de escoamento no trocador de calor. Portanto, estas preocupações devem estar presentes não só na fase de projeto detalhado como também na fase de projeto conceitual da rede.

Os coeficientes obtidos na etapa de estimativa de área são utilizados para o projeto conceitual da rede. Estes coeficientes são calculados considerando que a alocação da nova área será completamente vertical, mas raramente é possível alocar todos os trocadores em uma rede de modo vertical, ocorrendo então uma penalidade em área. Nos métodos de *retrofit* tradicionais, apenas a área alocada é penalizada pela alocação de trocadores não verticais. Já considerando restrições de queda de pressão o problema é mais complexo, pois existe um limite de queda de pressão que tem que ser respeitado, e uma possível alocação de um trocador não vertical penalizaria também a queda de pressão da corrente. Como a queda de pressão é uma restrição do problema ela não pode ser flexibilizada. Para resolver este problema a área será ainda mais penalizada, provocando uma distorção maior entre a estimativa e o projeto conceitual da rede.

A proposta para evitar que o trocador não viole o limite de queda de pressão estabelecido em uma corrente é que seja feita uma correção na área dos trocadores através da equação de projeto térmico e das equações de queda de pressão, tanto do lado do tubo como do lado do casco. Uma vez escolhida a posição de alocação de um novo trocador em uma rede, três parâmetros principais podem ser fixados:

- calor trocador no trocador;
- queda de pressão do lado do casco e

- queda de pressão do lado do tubo.

Com estes parâmetros fixados e utilizando as equações citadas é possível corrigir a área através do cálculo de novos coeficientes que não violem o limite de queda de pressão, utilizando as equações 5.5, 5.6 e 5.7, as quais são resolvidas simultaneamente.

Apesar desta correção aumentar ainda mais a diferença entre o valor estimado e o valor calculado no projeto conceitual, ela apresenta a vantagem de que o trocador calculado será operacional, pois satisfaz os limites de queda de pressão e mais, a área calculada no projeto conceitual será a mesma daquela calculada no projeto detalhado. Isto ocorre devido aos cálculos do projeto conceitual serem baseados nos dados geométricos que serão utilizados no projeto detalhado e em função da utilização de equações que já embutem o método de cálculo que será utilizado no projeto detalhado.

### 5.7. Exemplo de aplicação

Para a exemplificação desta nova abordagem de *retrofit* o caso analisado no capítulo anterior será abordado novamente, desta vez considerando limitações de queda de pressão nas correntes. Os dados deste problema já foram apresentados na tabela 4.1, para a consideração das limitações de queda de pressão são necessários, além de estabelecer a disponibilidade de queda de pressão de cada corrente, os dados de propriedades físicas destas. São necessárias também algumas características dos novos trocadores que serão projetados, bem como o conhecimento do método de cálculo para o projeto detalhado a ser utilizado. Neste trabalho, por razões já apresentadas em capítulos anteriores foi utilizado o método de KERN (1950) para o cálculo de projeto detalhado. Na tabela 5.1 são apresentados os dados de propriedades físicas das correntes, necessários para o cálculo das constantes da equação que relaciona  $\Delta P$ , área e  $h$ , a disponibilidade de queda de pressão para cada corrente. Já os dados das características de projeto dos trocadores necessários são definidas abaixo :

- Diâmetro interno do tubo ( $D_{it}$ ): 15,4 mm;
- Diâmetro externo do tubo ( $D_{et}$ ): 19,1 mm;
- Espaçamento entre os tubos ( $E_{et}$ ): 25,4 mm;
- Arranjo dos tubos: Triangular de 30°.

**Tabela 5.1** - Propriedade Física das correntes

Corrente	$\Delta P$ [kPa]	Propriedades físicas			
		$C_p$ [J/kg.°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\mu \times 10^3$ [kg/m.s]	$k$ [W/m.°C]
Q1	15,0	2600	750	0,5	0,12
Q2	20,0	2600	700	0,3	0,12
F1	10,0	2600	800	1,0	0,12
F2	12,0	2600	750	0,4	0,12
F3	15,0	2600	630	0,2	0,12

Como já foi mencionado, para a abordagem deste trabalho, a queda de pressão da corrente é definida em função da folga de operação do sistema de bombeamento. Neste caso, como se trata de um exemplo ilustrativo, os valores de queda de pressão apresentados na tabela 5.1 foram arbitrados para as correntes, sem serem extraídos de um processo real. Já os dados de propriedades físicas são característicos de processos que utilizam hidrocarbonetos.

### 5.7.1 Estimativa de área

A estimativa de área a ser adicionada a rede é realizada através do desenvolvimento de um programa em linguagem GAMS, que utiliza o modelo também implementado em GAMS, para a entrada dos dados a respeito dos casos. Neste programa também é escolhido o código de otimização utilizado para resolver o modelo, que para o modelo desenvolvido o mais adequado foi o CONOPT. Na estimativa da área além dos dados do problema é necessária definição do nível de recuperação de energia adotado, que está diretamente relacionado ao  $\Delta T_{min}$ . Para este exemplo escolheu-se um  $\Delta T_{min}$  de 20 °C, significando um consumo mínimo de utilidade quente de 9415,2 kW e um consumo de utilidade fria de 7406,0 kW.

Após a definição do novo nível de consumo de energia o programa desenvolvido foi executado, convergindo em 30 iterações. Este programa fornece como resultado: a área adicional, os coeficientes convectivos e as velocidades de escoamento, para as quedas de pressão disponíveis para as correntes. O programa também fornece a distribuição de carga térmica ao longo dos intervalos de entalpia, sendo que este resultado pode ser utilizado para a orientação da alocação dos trocadores na etapa seguinte a estimativa de área.

Na tabela 5.2, são apresentados os resultados de área adicional entre as correntes quentes e frias. Estes resultados mostram que algumas regiões da rede não necessitam de área adicional. Já a tabela 5.3 mostra a velocidade de escoamento e os coeficientes convectivos.

**Tabela 5.2** - Área adicional entre as correntes

Corrente	F1	F2	F3
Q1		27,9	
Q2	65,2		90,2

Os resultados apresentados na tabela 5.3 são mais interessantes para efeito de comparação, pois os coeficientes calculados podem ser comparados com os coeficientes assumidos para a rede existente. Observa-se que os valores dos coeficientes calculados são maiores que os coeficientes assumidos, indicando que a área estimada com estes coeficientes é menor que a área estimada com coeficientes constantes. Esta observação pode ser confirmado na tabela 4.1, já apresentada no capítulo anterior, onde a área de troca térmica foi estimada com os coeficientes assumidos para os trocadores existentes.

**Tabela 5.3** - Coeficientes e velocidades Calculados

Corrente	$h$ [kW/m <sup>2</sup> °C]	$Ve$ [m/s]
Q1	1,50	1,00
Q2	1,24	0,87
F1	1,60	1,54
F2	2,50	1,63
F3	3,03	1,64

Como consequência dos coeficientes assumidos para os trocadores existentes possuírem valores bem inferiores aos coeficientes calculados a velocidade de escoamento nos novos trocadores para estes coeficientes terão também valores bem abaixo daqueles mostrados na tabela 5.4. Isto indica que a queda de pressão das correntes não foi aproveitada ao máximo, e mais a

baixas velocidades de escoamento a deposição nos trocadores aumenta significativamente, ocasionando um menor tempo entre uma manutenção e outra do equipamento.

### 5.7.2 Análise dos trocadores existentes e reposicionamento

O passo seguinte do estudo de *retrofit* é a análise dos trocadores existente, e uma vez que a metodologia é fundamentada na transferência de calor vertical para o cálculo de área mínima adicional, deve-se avaliar qual a eficiência de alocação de área destes trocadores em relação ao modelo de transferência vertical proposto. Para efetuar a análise dos trocadores existentes, em relação ao modelo vertical, duas ferramentas são utilizadas: o diagrama da força motriz (*Driving Force Plot - DFP*) e a análise do problema remanescente (*Remaining Problem Analysis - RPA*). Estas ferramentas são amplamente utilizadas para a avaliação, tanto de trocadores existentes como para trocadores novos, por métodos tradicionais, como é o caso da metodologia desenvolvida por TJOE (1986). No entanto, para a metodologia proposta neste trabalho o estudo de *RPA* não pode ser utilizado, já que na modelagem matemática proposta, as áreas, existente e adicional, não podem ser comparadas, uma vez que são calculadas com base em coeficientes convectivos diferentes.

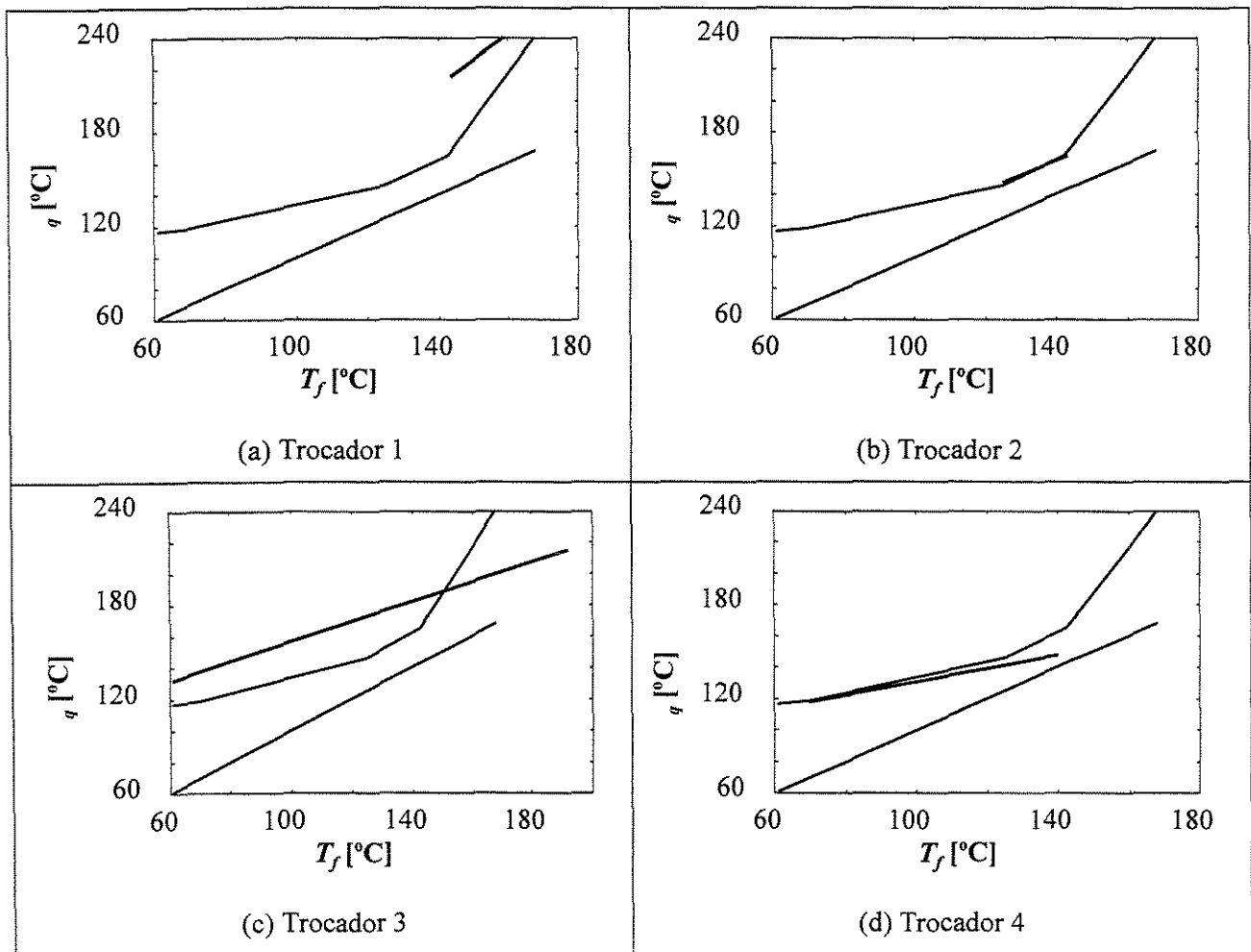
A distribuição de carga térmica é um dos resultados que pode ser obtidos com o modelo desenvolvido. Esta pode ser utilizada como um novo recurso para avaliar a alocação dos trocadores em relação ao modelo vertical, tanto para os trocadores existentes como para os trocadores novos. Através da observação das regiões onde a carga térmica dos trocadores existentes foi alocada pelo modelo de otimização pode-se definir se o trocador está bem ou mal alocado em relação ao modelo vertical, e mais pode-se ainda definir quais regiões o trocador apresenta maior eficiência na alocação de área.

As figuras 5.5(a) a 5.5(d) mostram o diagrama da força motriz para os 4 trocadores presentes na rede apresentada na figura 4.1. Nos quatro gráficos as duas curvas características da rede se repetem, a curva inferior de temperatura fria *versus* temperatura fria, e a curva superior de temperatura fria *versus* temperatura quente. Um trocador bem alocado deve estar o mais próximo o possível da curva superior, como é o caso do trocador 2 na Figura 5.5(b).

A localização dos trocadores em relação ao ponto *pinch* é outro fator a ser observado. No caso em estudo, a temperatura *pinch* é 125 °C para correntes frias e 145 °C para as correntes quentes. Por exemplo, o trocador 3, na Figura 5.5(c), está mal posicionado na rede, pois além de está distante da curva do processo, a curva superior, atravessa o *pinch*, e portanto deve ser



reposicionado. Já o trocador 4, Figura 5.5(d), está muito próximo à curva do processo, mas atravessa o *pinch*. O oposto ocorre com o trocador 1, Figura 5.5(a) que não atravessa o *pinch*, mas está afastado da curva do processo. No entanto, somente a análise qualitativa não é suficiente para definir se um determinado trocador deve ser reposicionado, uma análise quantitativa seria de importância fundamental.



**Figura 5.5** - Diagramas das forças motrizes para os trocadores existentes

Nos métodos tradicionais de *retrofit*, que utilizam coeficientes assumidos para a nova área, pode-se quantificar a eficiência de área através do *RPA*, pois as áreas, tanto a existente como a nova, podem ser comparadas, uma vez que utilizam os mesmos coeficientes. Já no caso do

algoritmo do *spaghetti network* modificado, esta comparação não é possível. Portanto a utilização da distribuição de carga térmica ao longo dos intervalos será necessária para a complementar as informações fornecidas pelo diagrama das forças motrizes. Esta distribuição de carga térmica, obtida da estimativa de área, será apresentada na forma de tabela.

Duas tabelas podem ser geradas a partir distribuição obtida da otimização, uma para a carga térmica já existente na rede e outra para a nova carga térmica a ser alocada na rede, como apresentados na tabela 5.4 e 5.5, respectivamente. Com a tabela de carga térmica da rede existente pode ser analisado o posicionamento dos trocadores, pois nesta apresenta-se a carga térmica alocada no intervalo e a faixa de temperatura em que esta carga foi alocada. Estas faixas de temperatura podem indicar qual a condição térmica mais favorável para que o trocador seja alocado verticalmente.

**Tabela 5.4 – Distribuição de carga térmica (Trocadores existentes)**

Cruzamento	Int1	Int2	Int3	Int4	
Q1xF1			2408,3		
Q1xF2					
Q1xF3		5127,1	730,3		
Q2xF1			141,0	899,3	
Q2xF2	181,1	2363,8	1180,1	1384,2	
Q2xF3					
$T_g$ [°C]	115,5	117,6	145,0	165,0	240,0
$T_f$ [°C]	61,0	70,0	125,0	143,4	168,6

Através da utilização da tabela 5.4 é possível estabelecer uma eficiência de alocação de carga térmica em relação carga térmica alocada nos trocadores existentes. No entanto, este valor de eficiência não é tão precisa quanto àquele utilizada no *RPA* tradicional. A partir das duas alocações de carga térmica, vertical e dos trocadores existentes, pode-se construir uma tabela da razão entre a carga térmica calculada e a alocada, definindo uma eficiência de carga térmica, como apresentado na tabela 5.6.

**Tabela 5.5**– Distribuição de carga térmica (Trocadores novos)

Cruzamento		Int1		Int2		Int3		Int4	
Q1xF1									
Q1xF2		310,2		639,1		-178,6			
Q1xF3						-1717,1			
Q2xF1								2624,5	
Q2xF2									
Q2xF3						406,8		1571,8	
$T_q$ [°C]	115,5		117,6		145,0		165,0		240,0
$T_f$ [°C]	61,0		70,0		125,0		143,4		168,6

**Tabela 5.6** – Eficiência da carga térmica alocada

Cruzamento	$Q_v$ [kW]	$Q_R$ [kW]	$Q_v/Q_R$
Q1xF1	2408,3	2560,0	0,94
Q1xF3	4139,7	4340,0	0,95
Q2xF1	1040,4	2160,0	0,48
Q2xF2	5109,2	7153,0	0,71

#### Trocador 1

O trocador 1 está alocado entre as correntes **Q2** e **F1**, com uma carga térmica de 2160 kW e uma área de 132,5 m<sup>2</sup>. O posicionamento do trocador é mostrado na figura 5.5(a), onde observa-se que este localiza-se acima do ponto *pinch*, e está bem posicionado em relação à curva do processo. No entanto, no *DFP* do trocador, mostrado na figura 5.5(a), é possível melhorar ainda mais a eficiência do trocador, aproximando a curva do trocador da curva  $T_f \times T_q$ . Isto é possível através do aumento da temperatura de saída da corrente fria, como pode ser observado na tabela 5.4.

A temperatura de saída da corrente fria pode ser aumentada até que a curva de posicionamento do trocador toque a curva  $T_f \times T_q$ . Neste caso, considerando que toda área existente seja utilizada, tem-se a seguinte condição de operação para o trocador:

Corrente quente

 $T_{ent}$ : 240,0 °C; $T_{sai}$ : 218,0 °C; $W_{cp}$ : 80,4 kW/°C;

Carga térmica: 1901,6 kW;

Área: 132,6 m<sup>2</sup>

Corrente fria

 $T_{ent}$ : 155,0 °C; $T_{sai}$ : 168,6 °C; $W_{cp}$ : 54,6 kW/°C;

Na figura 5.6 é apresentado o *DFP* para o trocador, antes e depois de ser realocado. A nova condição térmica do trocador está também de acordo com a região de alocação de área vertical na tabela 5.4, confirmando assim que o trocador está bem alocado na rede.

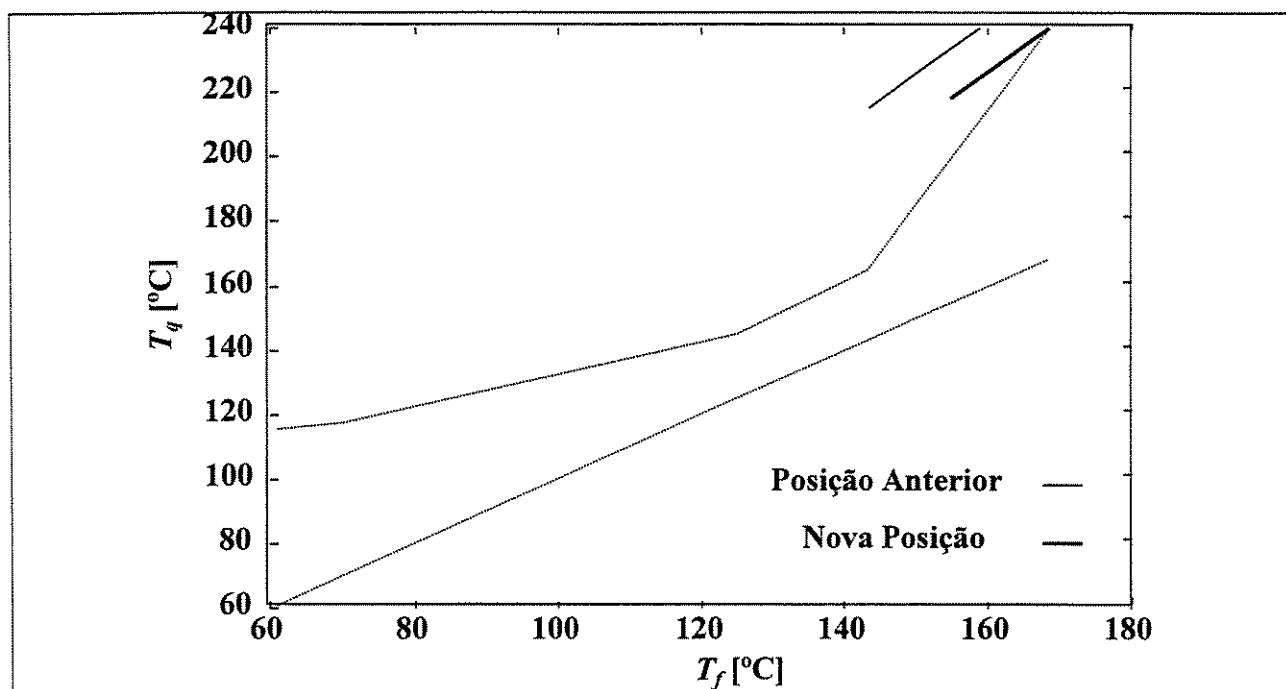


Figura 5.6 – Diagrama das forças motrizes para o trocador 1

#### Trocador 2

Na figura 5.5(b), pode-se observar que o trocador 2, alocado entre as correntes **Q1** e **F1**, está alocado praticamente de modo vertical, além de não cruzar o “pinch”. Isto pode também ser confirmado na tabela 5.6, onde a carga térmica alocada apresenta elevada eficiência em relação ao modelo vertical. Portanto, o trocador não necessita ser reposicionado.

A condição de operação para este trocador é:

Corrente quente

$$T_{ent}: 165,0\text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$T_{sai}: 147,7\text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$W_{cp}: 148,0\text{ kW}/^{\circ}\text{C};$$

Carga térmica: 2560,0 kW;

Área: 587,6 m<sup>2</sup>

Corrente fria

$$T_{ent}: 125,0\text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$T_{sai}: 143,4\text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$W_{cp}: 139,0\text{ kW}/^{\circ}\text{C};$$

#### Trocador 4

O trocador 4 tem uma área de 742,1 m<sup>2</sup> e troca 4340 kW entre a corrente quente **Q1** e a corrente fria **F3**. Pode-se observar que o trocador cruza o “pinch”, transferindo calor através do “pinch”. No entanto, utilizando as tabelas 5.4 e 5.6, pode-se observar que o trocador está bem alocado e não necessita de reposicionamento, mesmo violando o  $\Delta T_{min}$ .

A condição térmica do trocador é:

Corrente quente

$$T_{ent}: 147,7\text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$T_{sai}: 118,3\text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$W_{cp}: 148,0\text{ kW}/^{\circ}\text{C};$$

Carga térmica: 4340,0 kW;

Área: 742,1 m<sup>2</sup>

Corrente fria

$$T_{ent}: 70,0\text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$T_{sai}: 140\text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$W_{cp}: 62,0\text{ kW}/^{\circ}\text{C};$$

#### Trocador 3

O trocador 3 alocado entre as correntes **Q2** e **F2**, tem uma área de troca térmica de 724,1 m<sup>2</sup> e uma carga térmica de 7153,0 kW. O posicionamento do trocador na figura 5.5.c mostra que ele está mal alocado em relação à curva do processo, necessitando ser reposicionado. A análise energética, realizada em um processo, tem por objetivo primordial que o novo nível de recuperação de energia seja alcançado. Portanto, o consumo mínimo de utilidade deve ser respeitado. Logo, o trocador deve ser reposicionada de modo a satisfazer o consumo mínimo de utilidades frias.

O consumo mínimo de utilidade fria estabelecido para o  $\Delta T_{min}$  adotado é 7406,0 kW, sendo que 3460,0 kW já está alocado na corrente **Q1**. Portanto, restam serem alocados na corrente **Q2**

3946 kW. Com este consumo de utilidades e a capacidade térmica da corrente pode-se calcular a temperatura de entrada da corrente na utilidade fria, que é de 110,7 °C. Observando a tabela 5.4, pode-se constatar que grande parte de calor vertical trocado entre as duas está localizada no intervalo 2, onde a faixa de temperatura é próxima da faixa calculada acima. Alocando o trocador neste região tem-se as seguintes condições:

Corrente quente

$$T_{ent}: 168,5 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$T_{sai}: 110,7 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$W_{c_p}: 86,4 \text{ kW/}^\circ\text{C};$$

Carga térmica: 4991,0 kW;

Área: 742,1 m<sup>2</sup>

Corrente fria

$$T_{ent}: 61,0 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$T_{sai}: 152,4 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$W_{c_p}: 54,6 \text{ kW/}^\circ\text{C};$$

A figura 5.7 mostra o posicionamento do trocador após o seu reposicionamento. Nesta nova posição o trocador está bem mais próximo da curva do processo, indicando seu melhor posicionamento. No entanto, pode-se observar através das temperaturas dos trocadores que ocorre uma violação no  $\Delta T_{min}$ . Esta violação entretanto, pode ser aceita já que este é o melhor posicionamento do trocador e não implica em grande penalidade de área.

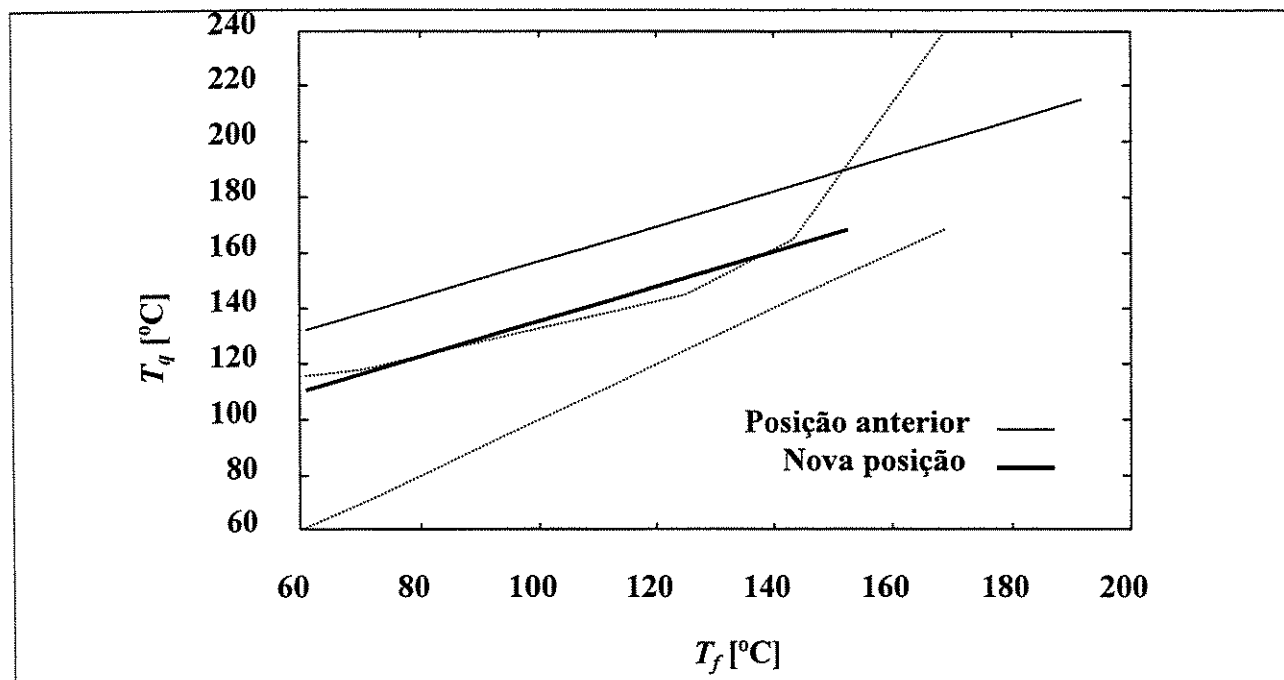
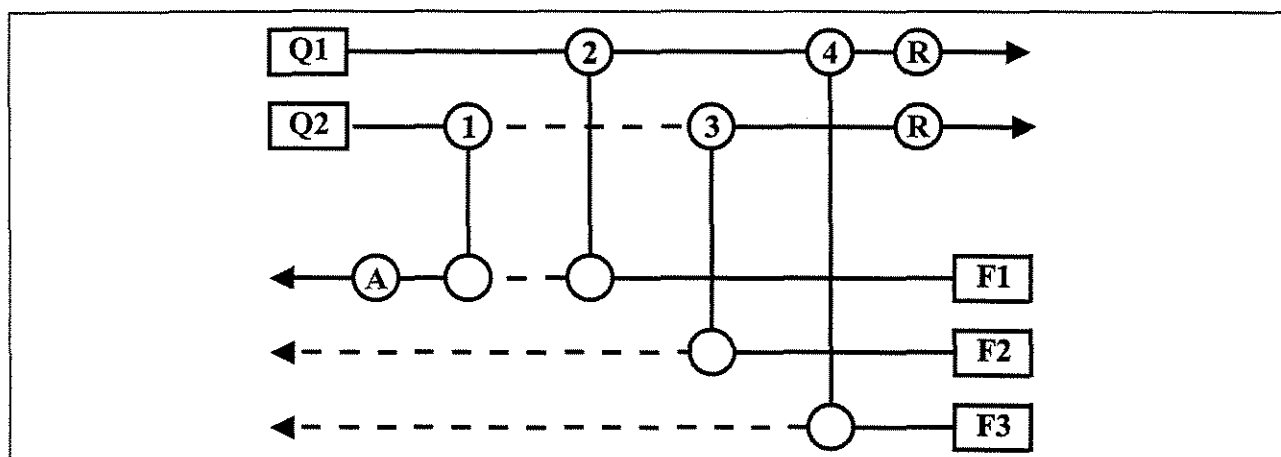


Figura 5.7 – Diagrama das forças motrizes para o trocador 3

Após o reposicionamento de todos trocadores em suas novas condições térmicas, surgem “pedaços” de correntes necessitam ser satisfeitas. A figura 5.8 ilustra esta situação, onde uma parte da corrente **Q2**, por exemplo, ainda necessita de aquecimento para ser completamente satisfeita. Estes “pedaços” de corrente serão satisfeitos com a alocação nova área de troca térmica.



**Figura 5.8** – Rede após a realocação dos trocadores

### 5.7.3 Alocação de novos trocadores

Após o reposicionamento dos trocadores existentes, utilizando o diagrama das forças motrizes e a tabela de distribuição de carga térmica, obtida do modelo desenvolvido no presente trabalho, deve-se alocar nova área afim de satisfazer as correntes que ainda não foram satisfeitas com o reposicionamento. As ferramentas utilizadas para a alocação da nova área, são as mesmas que foram utilizadas no reposicionamento dos trocadores existentes.

A alocação de novos trocadores pode ser considerada um subproblema do *retrofit*. Portanto, a partir da rede apresentada na figura 5.8 pode-se considerar uma sub-rede que deve satisfazer a um consumo mínimo de energia, estabelecido na estimativa de custos. Esta sub-rede a ser “sintetizada” é apresentada na figura 5.9. A rede apresentada na figura é especial, pois o consumo de utilidade fria dela já está satisfeito, e portanto toda a corrente quente deve ser consumida, havendo a necessidade apenas de utilidades quentes para suprir as correntes frias.

A tabela 5.5 apresenta a distribuição de carga térmica vertical para os novos trocadores, onde podem ser observadas cargas térmicas positivas e negativas. As cargas térmicas positivas representam área que deve ser alocada na rede, já as cargas negativas mostram que existem mais área que a necessária, indicando que esta área não está alocada verticalmente.

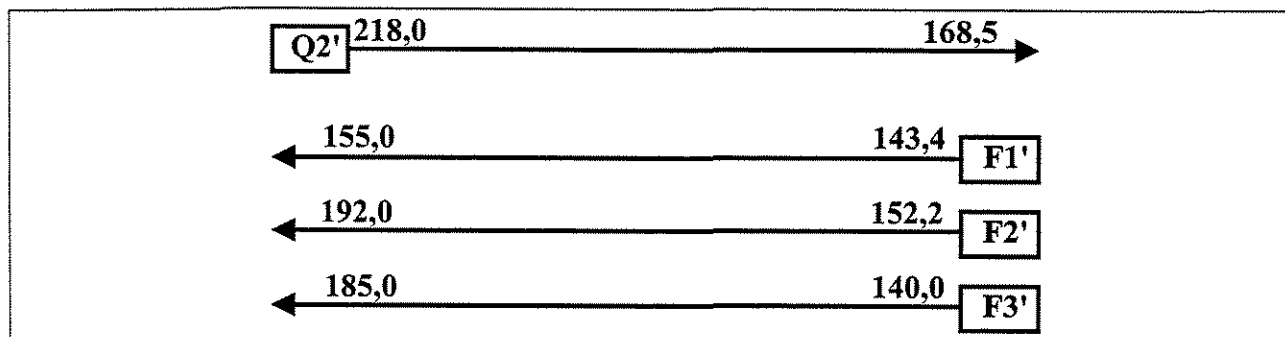


Figura 5.9 – Correntes que devem ser satisfeitas na etapa de alocação de nova área

A alocação de trocadores em uma rede como a mostrada na figura 5.9, pode ser considerado um problema de síntese, e como tal existem várias possibilidades para a alocação de área. O ponto de partida adotado para a alocação de novos trocadores será a tabela de alocação de carga térmica para os novos trocadores, onde apresenta que a corrente **Q2** pode trocar calor de modo vertical com as correntes **F1** e **F3**. Portanto, seguindo a tabela 5.5 poderia-se alocar um trocador entre a corrente **Q2** e **F1** e um outro trocador entre a corrente **Q2** e **F3**. Como consequência da consideração desta hipótese seria alocada uma utilidade na corrente **F2**. No entanto, o requerimento energético das correntes deve ser respeitados, juntamente com o consumo mínimo de utilidade.

#### Alocação do trocador T1

A corrente **F1** requer 1612,4 kW de energia e a corrente **Q2** pode fornecer 4276,8 kW, sendo portanto possível a alocação de um trocador entre as duas correntes, que satisfaria a corrente **F1**. A verticalidade deste trocador também pode ser avaliada com as ferramentas já apresentadas. O trocador alocado entre essas duas correntes tem a seguinte condição operacional:

Corrente quente

$$T_{ent}: 218,0 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$T_{sai}: 199,3 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$W_{cp}: 86,4 \text{ kW/}^{\circ}\text{C};$$

Corrente fria

$$T_{ent}: 143,4 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$T_{sai}: 155,0 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$W_{cp}: 139,0 \text{ kW/}^{\circ}\text{C};$$



Carga térmica: 1612,4 kW;

Área: 39,6 m<sup>2</sup>

#### Alocação do trocador T2

Resta ainda 2663,7 kW para serem trocados entre a corrente **Q1** e as demais correntes frias. Utilizando a tabela de alocação de carga térmica vertical para os novos trocadores, este calor seria trocado com a corrente **F3**. Portanto, para a alocação de um trocador entre essas duas correntes tem-se as seguintes condições operacionais:

Corrente quente

$T_{ent}$ : 199,3 °C;

$T_{sai}$ : 168,5 °C;

$W_{cp}$ : 86,4 kW/°C;

Corrente fria

$T_{ent}$ : 140,0 °C;

$T_{sai}$ : 182,9 °C;

$W_{cp}$ : 62, kW/°C;

Carga térmica: 2663,7 kW;

Área: 172,7 m<sup>2</sup>

A soma das área dos dois trocadores é 212,3 m<sup>2</sup>. Este valor comparado com o estimado tem um erro da ordem de 15%. Este erro poderia ser minimizado se os trocadores fossem alocados em paralelo na corrente **Q2**. No entanto, o desvio encontrado encontra-se dentro de uma faixa aceitável. A rede para o caso estudado é apresentada na figura 5.10.

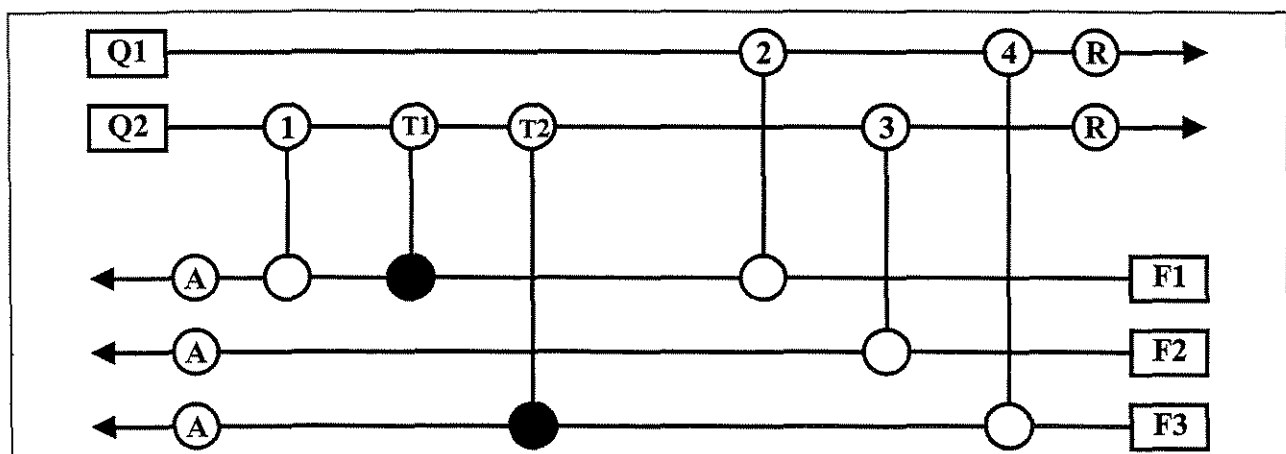


Figura 5.10 - Rede Modificada

#### 5.7.4 Correção dos coeficientes para satisfazer as restrições de queda de pressão

A alocação de trocadores novos seguiu os princípios apresentados no trabalho de TJOE (1986), com a diferença que os coeficientes utilizados para o cálculo de área são os obtidos pelo modelo do *spaghetti network* modificado. Os trocadores alocados devem satisfazer os limites de queda de pressão das correntes, bem como as velocidades de escoamento dos fluidos. No entanto, nem sempre é possível alocar um trocador em uma rede verticalmente. Portanto há a necessidade de correção dos coeficientes, para que as áreas dos trocadores satisfaçam as condições operacionais.

A correção dos coeficientes, como já foi exposto anteriormente, é realizada através da solução simultânea das equações 5.5, 5.6 e 5.7, para cada trocador, satisfazendo os limites de queda de pressão nas correntes e a carga térmica alocada. No caso de haver mais de um trocador alocado na corrente, distribui-se a queda de pressão proporcionalmente à área nova alocada na corrente, calculada com os coeficientes estimados.

Os dois trocadores alocados foram então recalculados para que as quedas de pressão disponíveis nas corrente fossem satisfeitas. Os resultados são mostrados nas tabelas 5.7 e 5.8, e a comparação da área calculada com a área estimada mostra grande concordância. Esta área, calculada com a correção dos coeficientes, é a mesma que aquela calculada na fase de projeto detalhado, já que as equações de cálculo dos coeficientes derivadas do método KERN (1950).

**Tabela 5.7** – Condição operacional dos novos trocadores alocados na rede

Trocador	Área [m <sup>2</sup> ]	Calor [kW]	$\Delta P_i$ [kPa]	$\Delta P_j$ [kPa]
T1	92,8	1612,4	4000	10000
T2	317,3	2663,7	16000	15000

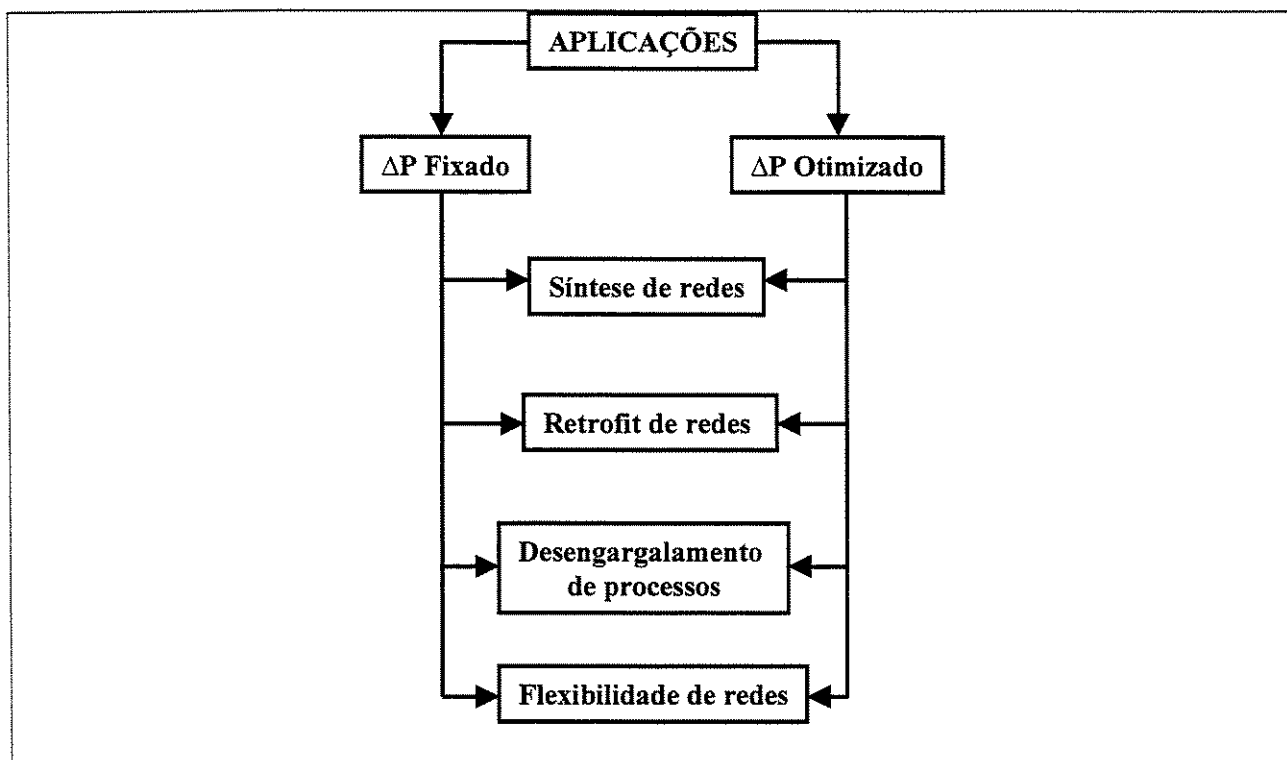
Tabela 5.8 – Projeto dos novos trocadores

	Trocador T1	Trocador T2
Área de Troca Térmica [m <sup>2</sup> ]	39,93	170,1
Coefficiente Convectivo Corrente Quente [kW/m <sup>2</sup> °C]	1,16	1,16
Coefficiente Convectivo Corrente Fria [kW/m <sup>2</sup> °C]	1,64	1,85
Número de tubos	151	470
Diâmetro do Casco [m]	0,38	0,64
Comprimento dos Tubos [m]	2,20	3.01
Número de Chicanas	18	29

### 5.8. Extensibilidade do modelo desenvolvido

No exemplo anterior foi mostrada a aplicação do modelo desenvolvido a uma situação típica de *retrofit*, onde definido o nível de recuperação de energia estima-se a área adicional e aloca-se novos trocadores. É importante ressaltar que o modelo apresentado neste capítulo é muito versátil, e que é possível adapta-lo a outras situações sem grande alterações. Por exemplo, com o modelo desenvolvido é possível a realização de uma otimização global, de área e queda de pressão em uma rede, apenas com a substituição da função objetivo. Na figura 5.11, é apresentado um esquema onde o modelo desenvolvido pode ser aplicado. Pode-se observar que as aplicações se dividem em dois grandes grupos: o primeiro, onde o objetivo é uma estimativa de custos para um valor de queda de pressão fixado, disponível no processo; e um segundo grupo onde será realizada uma otimização global. Neste caso, pode ser previsto um aumento não só de área, mas também um aumento na potência de bombeamento, através de funções de custo tanto para área e energia como para o sistema de bombeamento.

Portanto, através de pequenas adaptações na formulação do modelo desenvolvido pode-se realizar uma série de estudos em processos, não só considerando aspectos operacionais, mas também considerando aspectos estruturais, quando estes se fizerem presentes.



**Figura 5.11** – Possíveis aplicações do modelo desenvolvido

### 5.9. Discussão

Neste capítulo, foi dedicada atenção ao desenvolvimento de uma nova metodologia de retrofit de redes de trocadores de calor, em que os aspectos operacionais e estruturais fossem abordados de maneira simultânea. Foi visto que a abordagem utilizando a fusão de métodos tradicionais, que tratam cada um dos aspectos de forma isolada não foi possível, pois os coeficientes convectivos assumidos, utilizados na metodologia de SHOKOYA (1992), e os coeficientes calculados, utilizados na metodologia de PANJEH-SHAHI (1992) deveriam ser diferenciado um do outro, mas o modelo não comportava esta possibilidade. Uma nova abordagem foi então, onde estrutura *spaghetti network* foi modificada para comportar a diferença entre os dois coeficientes.

No capítulo, também foi apresentada uma nova ferramenta que pode guiar o projetista, na alocação de área entre as correntes. Esta, denominada de Tabela de alocação de carga térmica, possibilita a localização de regiões na rede em que é mais favorável a alocação do trocador.

O exemplo apresentado, mostrou a grande concordância ente a estimativa e o projeto da rede, estando muito próximo de um projeto detalhado de trocador que utiliza o método KERN (1950) e os limites de queda de pressão adotados na estimativa.

## Capítulo 6 - ESTUDO DE CASOS

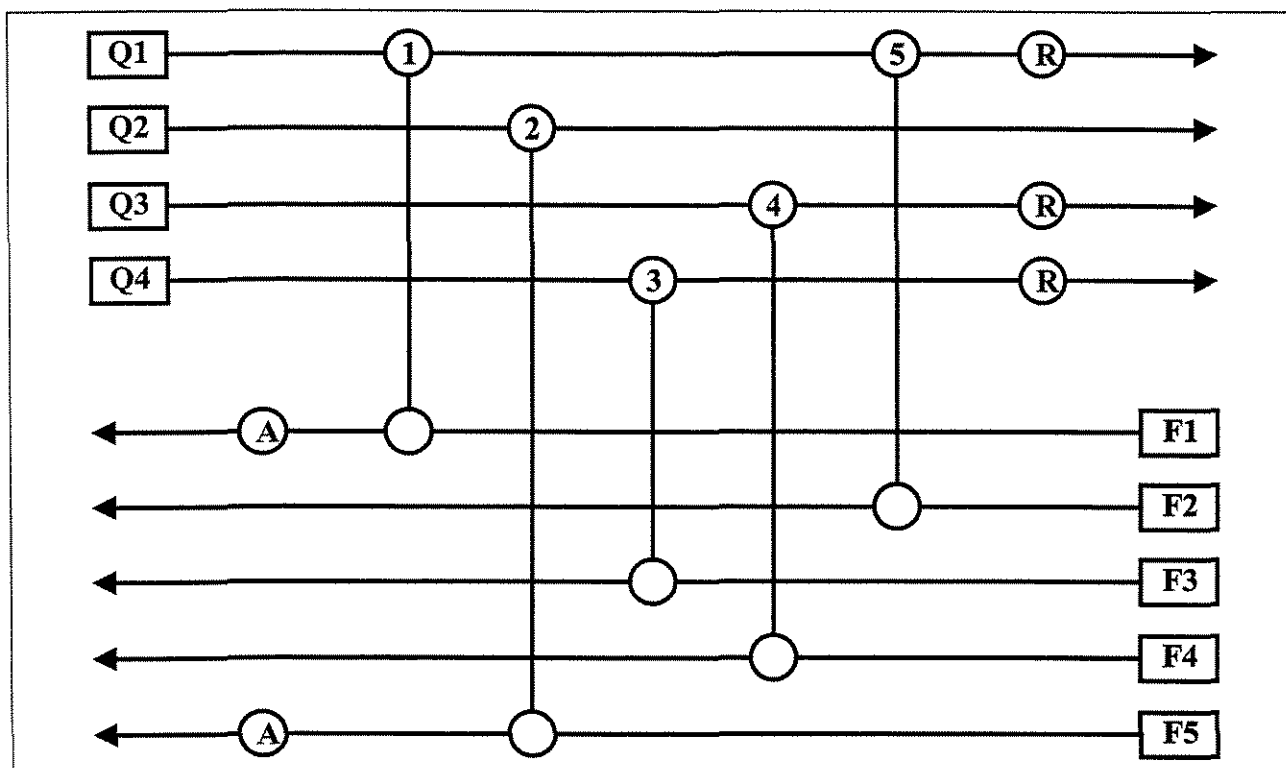
No capítulo anterior, a metodologia de *retrofit* proposta, que contempla queda de pressão das correntes e a distribuição de área na rede, foi demonstrada para um caso presente na literatura, incluindo-se limites de queda de pressão para as correntes, coerentes com as velocidades de escoamento, bem como dados de propriedades físicas destas. Um nível de recuperação de energia foi escolhido e analisado, com o objetivo de obter uma rede que satisfizesse o requerimento de energia desejado, de acordo com as limitações operacionais.

Neste capítulo, esta metodologia será aplicada à duas situações de *retrofit* apresentadas no terceiro capítulo: a primeira, o *retrofit* para a redução do consumo de energia em processos existentes; e a segunda, o *retrofit* aplicado a flexibilidade de redes através da eliminação de gargalos energéticos presentes no processo. No primeiro caso, trata-se de um processo com baixa eficiência energética e que deve ser modificado para um novo nível de recuperação de energia, baseando-se em aspectos econômicos. Já no segundo caso, o processo deve operar em uma nova condição, e a rede existente já está operando no gargalo, não sendo possível o aumento do consumo de energia. Portanto, deve-se realizar o *retrofit* para a redução do consumo de energia considerando a condição existente e a nova condição.

### 6.1. *Análise econômica para a redução do consumo de energia*

A análise econômica em *retrofit*, como já foi explicada, busca estabelecer condições de economia de energia em redes existentes a partir de limitações de ordem econômica. A aplicação da nova metodologia à redução de consumo de energia baseado em análise econômica, mostrará que não só os limites econômicos são importantes em *retrofit*, mas também que as limitações físicas de operação dos equipamentos devem ser consideradas, para uma bem sucedida estimativa de custo.

O caso apresentado no trabalho de TJOE (1986) será estudado neste tópico. Trata-se do caso de um planta de produção de aromático com nove correntes, sendo quatro quentes e cinco frias. Como pode ser observado na figura 6.1, a rede apresenta cinco trocadores, três utilidades de resfriamento e duas utilidades de aquecimento.



**Figura 6.1** – Rede da planta de aromático apresentada em TJOE (1986)

Os dados das correntes são apresentados na Tabela 6.1 e os dados dos trocadores existentes, assim como os das utilidades na Tabela 6.2.

**Tabela 6.1** – Dados das correntes para o estudo de análise econômica

Corrente	$T_e$	$T_s$	$W_{cp}$	$h$
Q1	327,0	30,0	100,0	0,80
Q2	220,0	160,0	160,0	0,50
Q3	220,0	60,0	60,0	2,00
Q4	160,0	45,0	200,0	0,40
F1	100,0	300,0	100,0	5,00
F2	35,0	164,0	70,0	1,00
F3	80,0	125,0	175,0	0,50
F4	60,0	170,0	60,0	0,20
F5	140,0	300,0	200,0	0,80

Como já foi visto no capítulo anterior, devido à metodologia desenvolvida abordar o problema de *retrofit* levando em consideração aspectos operacionais, esta requer uma quantidade maior de informações sobre o processo. Com os dados apresentados nas Tabelas 6.1 e 6.2, seria possível apenas a análise térmica da rede. Já para a análise considerando as limitações de queda de pressão das correntes, as propriedades físicas das correntes, bem como os limites de queda de pressão destas são essenciais para a realização da análise. Estes dados, são apresentados na Tabela 6.3, onde foram utilizados dados de propriedades físicas típicos de correntes de processos petroquímicos e limites de queda de pressão dentro da faixa de operação em processos industriais, tendo sido escolhido arbitrariamente apenas para a aplicação da metodologia.

**Tabela 6.2** – Dados dos trocadores

Trocador	$A$ [m <sup>2</sup> ]	$Q$ [kW]
1	300,0	15300,0
2	1222,0	9600,0
3	939,0	7875,0
4	726,0	6600,0
5	831,0	9030,0
R <sub>Q1</sub>	---	5370,0
R <sub>Q2</sub>	---	3000,0
R <sub>Q3</sub>	---	15125,0
A <sub>F1</sub>	---	4700,0
A <sub>F2</sub>	---	22400,0

Além das informações adicionais da correntes, apresentadas na Tabela 6.3, para a aplicação da metodologia desenvolvida a *retrofit* para a redução do consumo de energia, também são necessárias informações básicas sobre a geometria dos trocadores, iguais às apresentas no capítulo anterior, que são diâmetro interno do tubo ( $D_{it}$ ), diâmetro externo ( $D_{et}$ ), espaçamento entre os tubos ( $E_{et}$ ) e arranjo dos tubo. Para este caso foram considerados seguintes dados:

- $D_{it}$  : 15,4 mm;
- $D_{et}$ : 19,1 mm;

- $E_{et}$ : 25,4 mm;
- Arranjo triangular de 30°.

Tabela 6.3 - Propriedade Física das correntes

Corrente	$\Delta P$ [kPa]	Propriedades físicas			
		$C_p$ [J/kg.°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\mu \times 10^3$ [kg/m.s]	$k$ [W/m.°C]
Q1	60,0	2600	750	0,3	0,12
Q2	10,0	2600	750	0,3	0,12
Q3	40,0	2600	750	0,3	0,12
Q4	25,0	2600	750	0,3	0,12
F1	50,0	2600	800	0,5	0,12
F2	20,0	2600	800	0,5	0,12
F3	30,0	2600	800	0,5	0,12
F4	30,0	2600	800	0,5	0,12
F5	60,0	2600	800	0,5	0,12

### 6.1.1 Análise térmica da rede existente

A rede mostrada na figura 6.1 está operando com um consumo de 27100 kW de utilidade quente e 23500 kW de utilidade fria. Já a área total de troca térmica entre as correntes é de 4018 m<sup>2</sup>, sendo que nestas condições a rede apresenta um  $\Delta T_{min}$  de 10 °C. Este consumo de utilidade esta bem acima do consumo esperado para uma rede com este  $\Delta T_{min}$ , que seria de 14375 kW para utilidades frias e 17980 kW para as quentes. Portanto, a necessidade de um estudo de *retrofit* neste caso é plenamente justificada, em função da baixa eficiência energética da rede. A questão é: quanto seria necessário investir em área para melhorar a eficiência energética desta rede? Este é o assunto abordado no próximo tópico.

### 6.1.2 Avaliação econômica

A análise econômica em *retrofit* envolve a definição de objetivos, os quais estão relacionados a tempo de retorno do capital investido para a recuperação de energia ou a um investimento máximo. Para efeito de aplicação da metodologia desenvolvida foi estabelecido um investimento máximo de **1000000 US**, ou um tempo de retorno (*payback*) máximo **1,3 anos**. Esta



análise necessita da utilização de uma equação de custos para o cálculo do investimento em área dada por:

$$C_i = 8600 + 670A^{nov0.83} \quad (6.1)$$

onde  $C_i$  é o custo de investimento em dolar [US\$] e  $A^{nov}$  a área adicional em  $m^2$ .

Há a necessidade também de uma equação para o retorno de capital, que é função da redução do consumo de energia, dada por:

$$R_c = 110(Q_h - Q_{min}) \quad (6.2)$$

onde  $R_c$  é o capital de retorno referente a redução do consumo de energia, em dolar [US\$],  $Q_h$  o consumo de calor na rede antes do *retrofit* e  $Q_{min}$  o consumo determinado pela análise econômica. Os valores apresentados nas equações foram extraídos do trabalho de TJOE (1986).

A curva de *retrofit* da rede, considerando as limitações de queda de pressão das correntes, pode então ser construída a partir da utilização do modelo desenvolvido no capítulo anterior, através da aplicação do mesmo a uma faixa de  $\Delta T_{min}$ . Após o cálculo de área para uma faixa de  $\Delta T_{min}$ , utilizando as equações (6.1) e (6.2) pode-se construir um gráfico como o apresentado na figura 6.1.2. Nesta figura, traça-se também as curvas de investimento máximo e *payback* máximo, as quais determinam qual o nível de recuperação de energia adotado no *retrofit* da rede.

Pode-se visualizar na figura 6.2 para o caso em questão que o limitante é o investimento. O ponto onde a curva de *retrofit* cruza com o curva de investimento limite determina o  $\Delta T_{min}$  que deve ser utilizado no *retrofit* da rede. Neste caso, o  $\Delta T_{min}$  para este investimento deve ser de 13 °C, sendo que toda a análise energética será baseada neste  $\Delta T_{min}$ .

A análise *retrofit* baseada em métodos tradicionais considera apenas aspectos térmicos da rede não levando em consideração, na etapa de pré análise, os aspectos operacionais. Portanto, a determinação dos níveis de recuperação de energia na curva de *retrofit* é função apenas de investimento e tempo de retorno, sendo escolhido o mais favorável. No entanto, quando os aspectos operacionais são considerados, a análise apenas deste parâmetros não garantem a operabilidade da rede. Limitações da velocidade de escoamento podem também limitar os níveis

de investimento na rede, uma vez que deve-se operar entre uma faixa mínima e máxima de velocidade de escoamento. Estes limites devem ser respeitados, pois trocadores operando com velocidades elevadas apresentam vibração, enquanto trocadores que operam com baixas velocidades de escoamento provocam um aumento na taxa de deposição, diminuindo em ambos os casos o tempo de operação do equipamento.

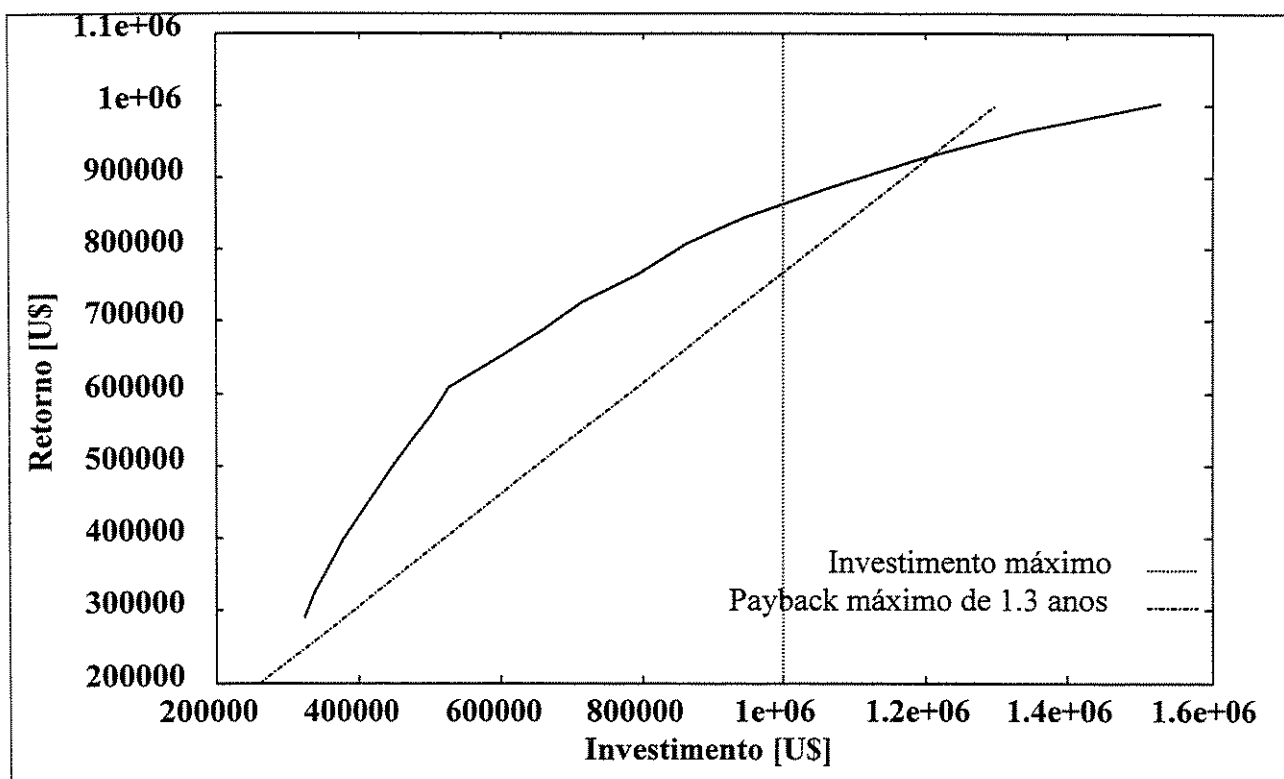


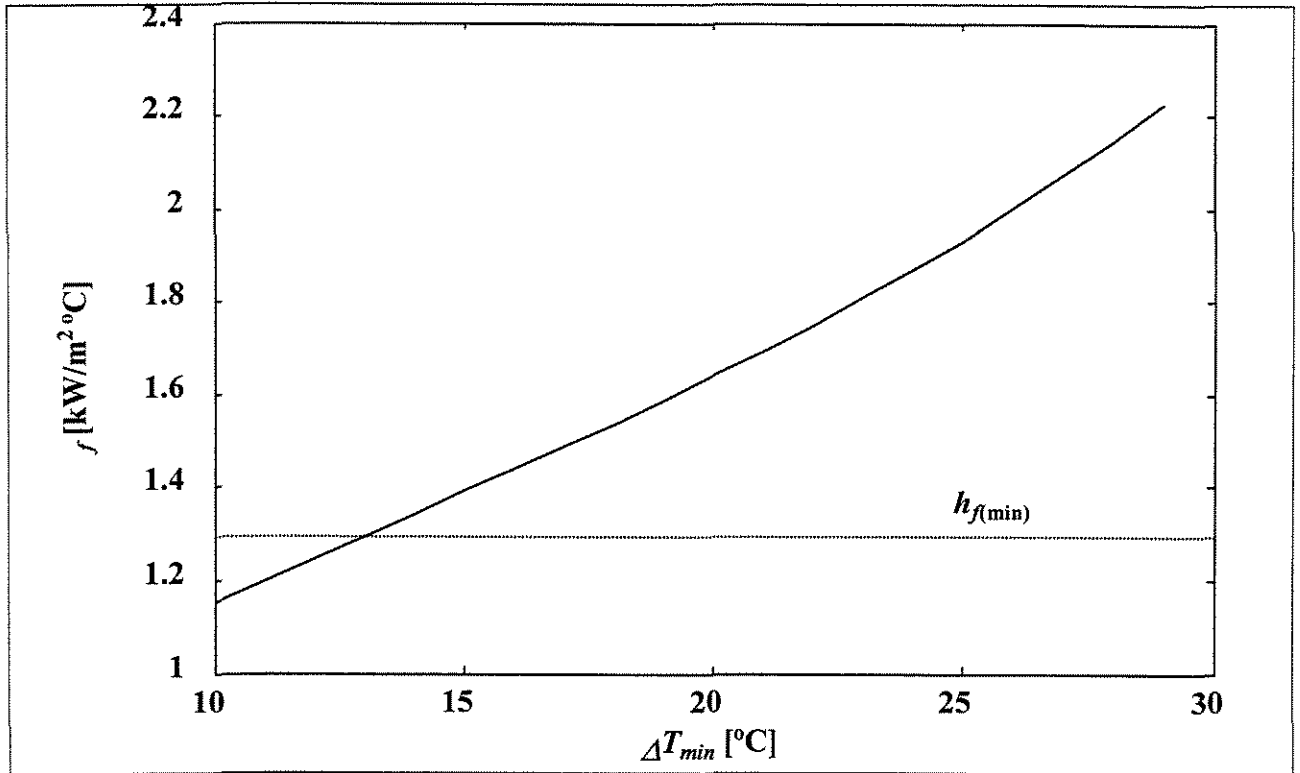
Figura 6.2 – Curva de *retrofit* para o caso de eliminação de gargalos

A queda de pressão das correntes exerce influência direta sobre as velocidades de escoamento no trocador. Um trocador que tem uma pequena queda de pressão, possui valores de velocidades de escoamento baixos. Por outro lado se este mesmo trocador possuir uma elevada queda de pressão as velocidades de escoamento também serão elevadas. A implicação disto é: mesmo que hajam largos limites de queda de pressão em redes que sofrerão *retrofit*, nem sempre será possível utilizá-los completamente, pois os limites máximos aceitáveis para as velocidade de escoamento limitarão a utilização da queda de pressão disponível nas correntes. Já para a situação

de baixas quedas de pressão, disponíveis nas correntes, a limitação de baixa velocidade de escoamento pode impedir a utilização da queda de pressão disponível em uma dada corrente.

Nos estudos de *retrofit*, observa-se que à medida que os níveis de recuperação de energia aumentam, o requerimento de área também aumenta, ou seja, há a necessidade de um maior investimento. Quando as limitações de queda de pressão influenciam na alocação de área, caso da metodologia proposta no presente trabalho, as situações operacionais podem limitar o investimento em área. Em uma situação de *retrofit* com limitação de queda de pressão para as correntes, a mesma queda de pressão disponível deve ser utilizada tanto para um baixo nível de integração de energia, como para elevados níveis de recuperação de energia. Portanto, esta queda de pressão em baixos níveis de recuperação de energia levam a elevadas velocidades de escoamento, e que por sua vez levam a altos valores de coeficiente convectivo para as correntes. Já em elevados níveis de recuperação de energia, esta queda de pressão levará a baixos valores de velocidade de escoamento, uma vez que uma grande quantidade de área será requerida, levando a baixos valores de coeficientes convectivos. No primeiro caso, o limite máximo da velocidade de escoamento limitaria a quantidade de queda de pressão disponível que poderia ser utilizada na etapa de *retrofit*, acarretando um aumento na área estimada. No segundo caso, o limite mínimo da velocidade de escoamento pode inviabilizar o *retrofit* em determinados níveis de recuperação de energia, pois mesmo havendo queda de pressão na corrente, esta não poderia ser utilizada pois as velocidades de escoamento seria tão baixas, que não seria possível utilizar a queda de pressão disponível.

As equações 5.9 e 5.12 relacionam o coeficiente convectivo com a velocidade de escoamento. A partir destas equações, pode-se estabelecer limites mínimos e máximos para os coeficientes das correntes, os quais estão relacionados aos limites operacionais da velocidade de escoamento. A figura 6.3 apresenta um gráfico da variação do coeficiente convectivo em função do nível de recuperação de energia na rede para a corrente **F1**. Pode-se observar que a partir de um dado nível de integração de energia o valor do coeficiente está a baixo do mínimo estabelecido, tornando a análise energética inviável. Portanto, não só as curvas de investimento máximo e *Payback* máximo limitam o nível de recuperação de energia, as limitações decorrentes das velocidades de escoamento também podem limitar o quanto deve ser investido para operar a rede com o sistema de bombeamento existente.



**Figura 6.3** – Variação do coeficiente convectivo da corrente **F1** em função do  $\Delta T_{min}$

No caso em estudo, o  $\Delta T_{min}$  adotado foi definido pelo máximo investimento de 1000000 US\$, sendo que as limitações físicas poderiam limitar este investimento. No entanto, o limite inferior de coeficiente convectivo coincidiu com o  $\Delta T_{min}$  de 13 °C, sem que fosse necessário reduzir o nível de recuperação de energia para satisfazer restrições operacionais.

### 6.1.3 Estimativa de área adicional e coeficientes convectivos

Levantada a curva de *retrofit*, com o modelo desenvolvido, respeitando as limitações nas velocidades de escoamento, e definido o  $\Delta T_{min}$  que deve ser utilizado, a análise energética é realizada da mesma forma que o demonstrado no capítulo anterior. Na realidade, a área já foi estimada para construção da curva de *retrofit*. Nesta etapa, deve-se ressaltar como a área adicional está distribuída entre as correntes. A matriz de área vertical adicional, que resulta da otimização, é mostrado na Tabela 6.4.

**Tabela 6.4** – Área vertical adicional

Corrente	F1	F2	F3	F4	F5
Q1	84,79			523,27	360,03
Q2	326,55				21,70
Q3		19,64	223,30		576,93
Q4	805,47	230,37	470,85	93,48	144,47

Além da matriz de área adicional, o modelo também fornece como resultado os coeficientes convectivos das correntes e as velocidades de escoamento. Os dados de coeficientes convectivos são fundamentais para o cálculo dos trocadores adicionais. Estes são apresentados na tabela 6.5, juntamente com as velocidades de escoamento.

**Tabela 6.5-** Coeficientes e velocidades calculados

Corrente	$h$ [kW/m <sup>2</sup> °C]	$V_e$ [m/s]
Q1	0,57	0,87
Q2	0,54	0,85
Q3	0,49	0,80
Q4	0,77	0,95
F1	1,29	1,57
F2	1,41	1,69
F3	1,54	1,81
F4	1,31	1,59
F5	1,71	1,97

#### 6.1.4 Análise dos trocadores existentes e reposicionamento

A análise dos trocadores, semelhantemente ao capítulo anterior, utilizou principalmente o diagrama das forças motrizes, uma vez que utilização da análise do problema remanescente fica comprometida, pois a metodologia desenvolvida não trabalha com a idéia de área mínima da rede, e sim a área mínima adicional. Em função disto, a distribuição de carga térmica entre as correntes ao longo dos intervalos, também utilizada no capítulo anterior, tornou-se de grande

importância na avaliação do posicionamento dos trocadores. Os diagramas das forças motrizes para os trocadores existentes, considerando o nível de recuperação adotado, são apresentados nas figura 6.4(a) a 6.4(e), mostrando qualitativamente o posicionamento dos trocadores.

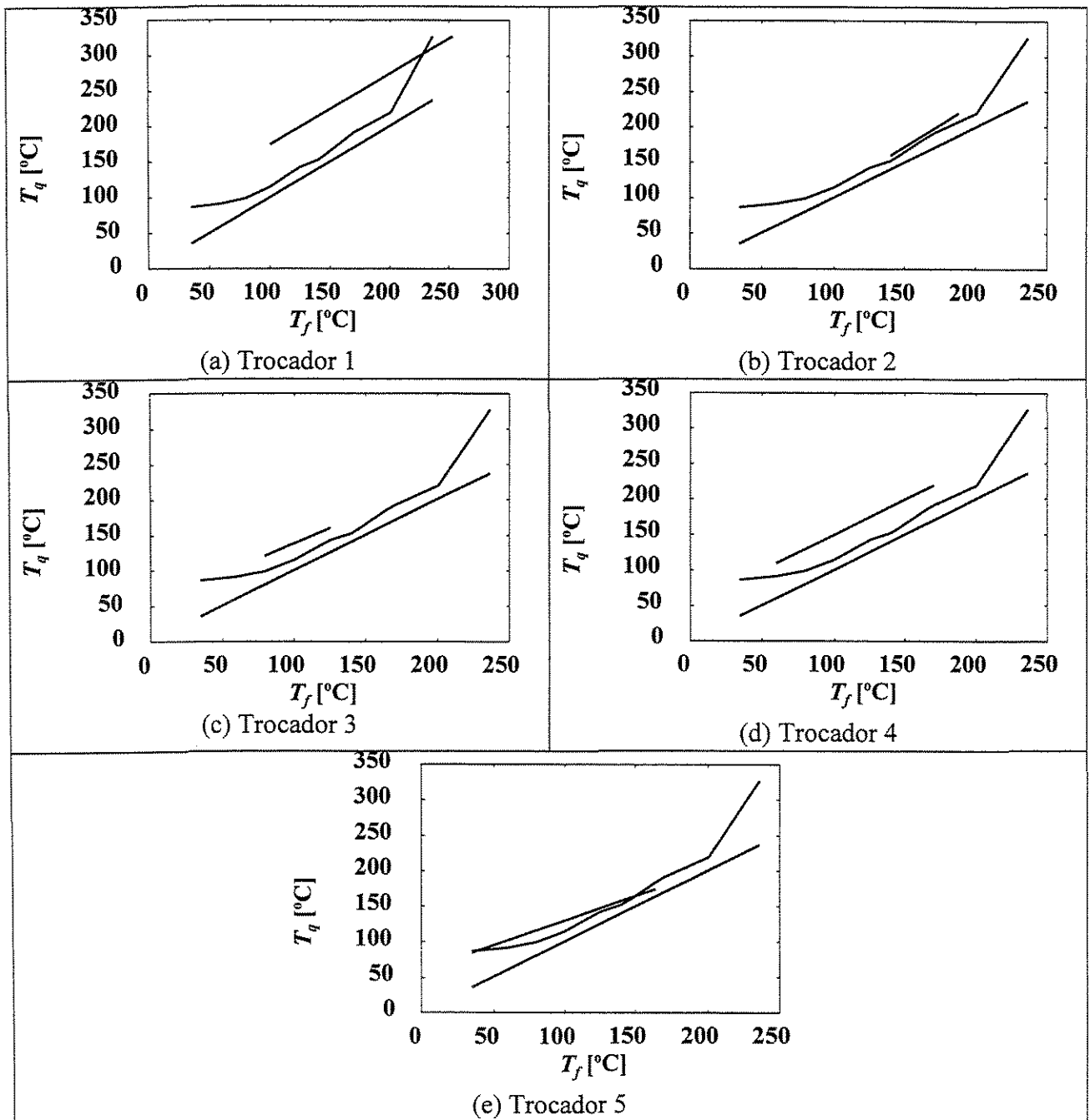


Figura 6.4 – Diagrama das forças motrizes para os trocadores existentes

Os gráficos dos trocadores mostram que com exceção do trocador 2 os demais trocadores deverão necessitar de reposicionamento, pois o ponto *pinch* para este consumo de energia ocorre em 153 °C para as correntes quentes e 140 °C para as frias. Excetuando-se os trocadores 2 e 3, todos os demais cruzam o ponto *pinch*. Apesar do trocador 3 não cruzar o *pinch*, sua posição em relação a curva do processo ( $T_q$  versus  $T_f$ ) pode ser melhorada, através da sua aproximação à curva. No entanto, somente o diagrama das forças motrizes é insuficiente para se estabelecer quais as novas condições térmicas dos trocadores existentes.

A distribuição de carga térmica ao longo dos intervalos foi utilizada para auxiliar o reposicionamento dos trocadores. Esta é uma ferramenta muito poderosa, permitindo o estabelecimento de faixas de operação vertical para os trocadores. Na tabela 6.5 é mostrada a distribuição de carga térmica ao longo dos intervalos para o caso em estudo, extraídos da otimização, apresentando sua parte os intervalos de temperatura de cada intervalo.

**Tabela 6.5 - Distribuição de carga térmica (Trocadores existentes)**

Cruzamento	INT1	INT2	INT3	INT4	INT5	INT6	INT7	INT8	INT9	INT10	
F1Q1							39,6	315,0	2253,4	3566,6	
F2Q1	486,1	137,8	1400,	1750,0	958,3	379,3	1269,7				
F3Q4			381,0	3125,0							
F4Q3		433,3	856,5	437,5	575,0						
F5Q2							2019,4	791,0	4423,3		
$T_f$ [°C]	35,0	60,0	80,0	100,0	125,0	140,0	145,8	164,0	170,0	200,8	236,4
$T_q$ [°C]	86,2	91,1	98,3	115,2	143,4	153,0	160,0	184,3	191,1	220,0	327,0

### Trocador 1

O trocador 1 tem uma área alocada de 299,8 m<sup>2</sup> e troca 15300 kW entre as correntes Q1 e F1. Este trocador está mal posicionado, tanto em relação ao ponto *pinch*, como em relação curva do processo. Utilizando a tabela 6.5, pode-se identificar qual a região da rede que o trocador melhor se posiciona. Desta observação, alocou-se o trocador entre os intervalos 7 e 9. A nova posição do trocador em relação a curva  $T_q$  versus  $T_f$  é apresentada na figura 6.5, podendo-se considerar que o trocador está alocado de modo vertical. As condições de operação para o trocador são:

Corrente quente

$$T_{ent}: 220,0\text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$T_{sai}: 180,3\text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$W_{c_p}: 100,0\text{ kW}/^{\circ}\text{C};$$

Carga térmica: 3770 kW;

$$\text{Área: } 299,8\text{ m}^2$$

Corrente fria

$$T_{ent}: 161,1\text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$T_{sai}: 200,8\text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$W_{c_p}: 100\text{ kW}/^{\circ}\text{C};$$

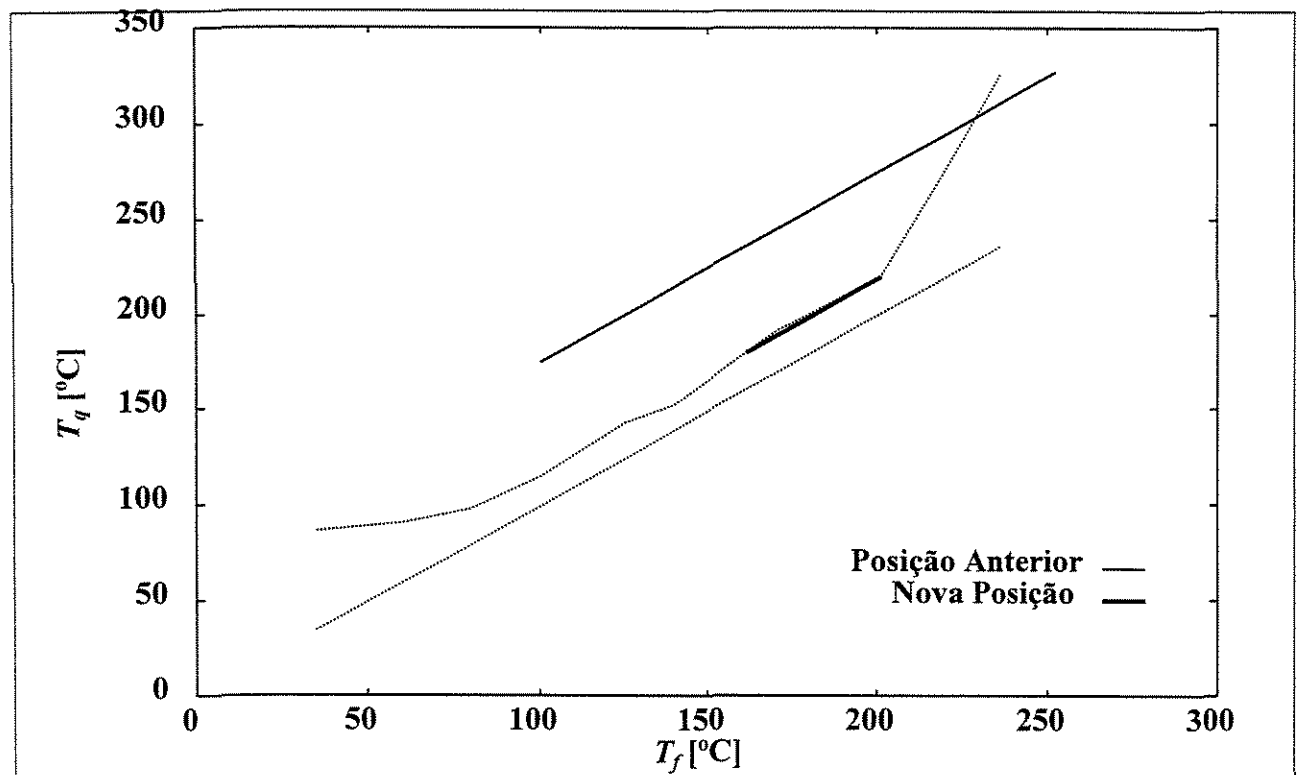


Figura 6.5 – Diagrama das forças motrizes para o trocador 1

### Trocador 2

O trocador 2 está bem posicionado, tanto em relação ao ponto *pinch*, como em relação à curva  $T_q$  versus  $T_f$ . Este trocador possui uma área de 1222,0 m<sup>2</sup> e troca 9600 kW entre as correntes Q2 e F5. Uma análise na tabela 6.5, mostra que o trocador está bem posicionamento em relação aos intervalos de entalpia, o que confirma que não é necessário reposicionar o trocador 2.



### Trocador 3

O trocador 3 está localizado abaixo do *pinch*, mas está afastado da curva  $T_q$  versus  $T_f$ , precisando de ser reposicionado na rede. Pela tabela 6.5, o trocador deveria operar numa faixa de temperatura mais estreita. Este trocador foi reposicionado utilizando os intervalos de entalpia da tabela 6.1.5, em que a troca de calor entre as correntes ocorre de modo vertical. O resultado pode ser observado na figura 6.6. O trocador reposicionado apresenta as seguintes condições de operação:

Corrente quente:

$$T_{ent}: 143,4\text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$T_{sai}: 122,7\text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$W_{Cp}: 200,0\text{ kW}/^{\circ}\text{C};$$

Carga térmica: 4140,0kW;

Área: 939,0 m<sup>2</sup>

Corrente fria:

$$T_{ent}: 101,3\text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$T_{sai}: 125,0\text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$W_{Cp}: 175\text{ kW}/^{\circ}\text{C};$$

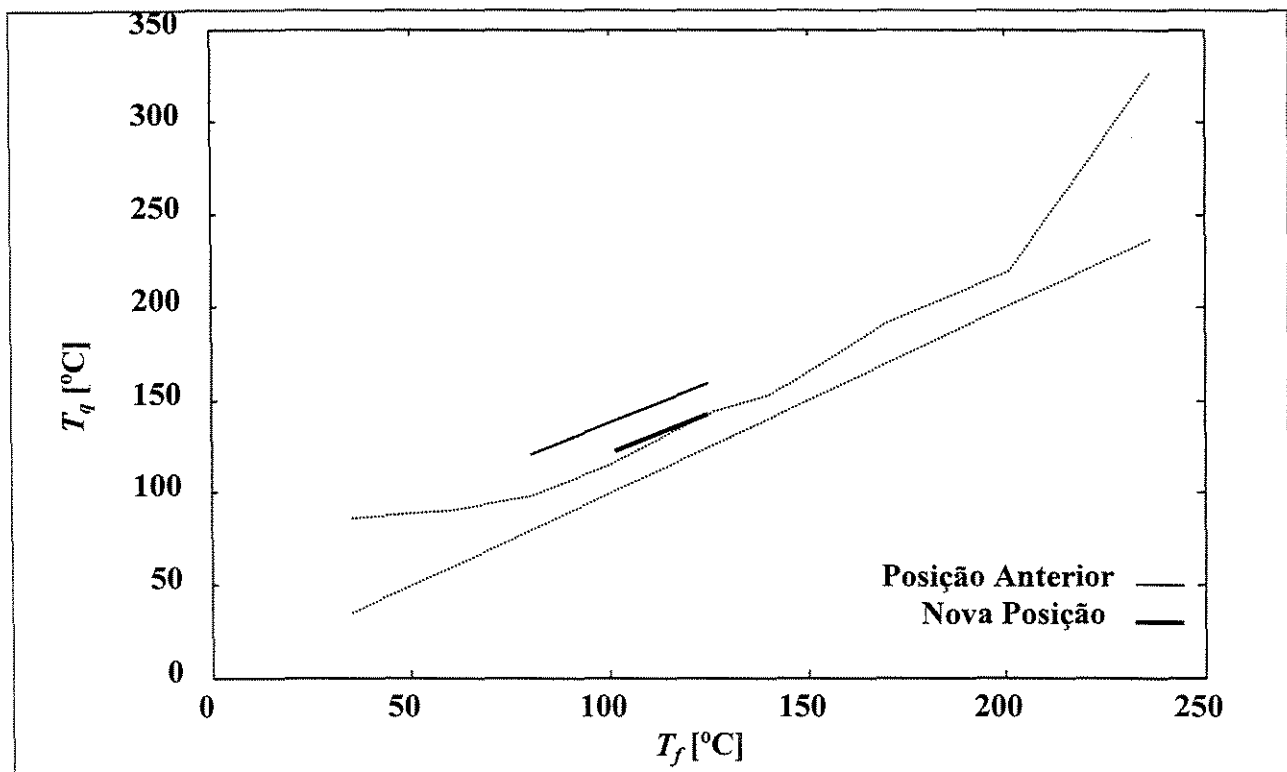


Figura 6.6 – Diagrama das forças motrizes para o trocador 3

Trocador 4

O trocador 4 está atravessando o ponto *pinch* bem afastado da curva  $T_q$  versus  $T_f$ , auxílio da tabela 6.5 ele pode ser melhor posicionado, como mostra a figura 6.7. As novas condições térmicas do trocador são:

Corrente quente:

$$T_{ent}: 138,5\text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$T_{sai}: 98,3\text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$W_{C_p}: 60,0\text{ kW}/^{\circ}\text{C};$$

Carga térmica: 2412kW;

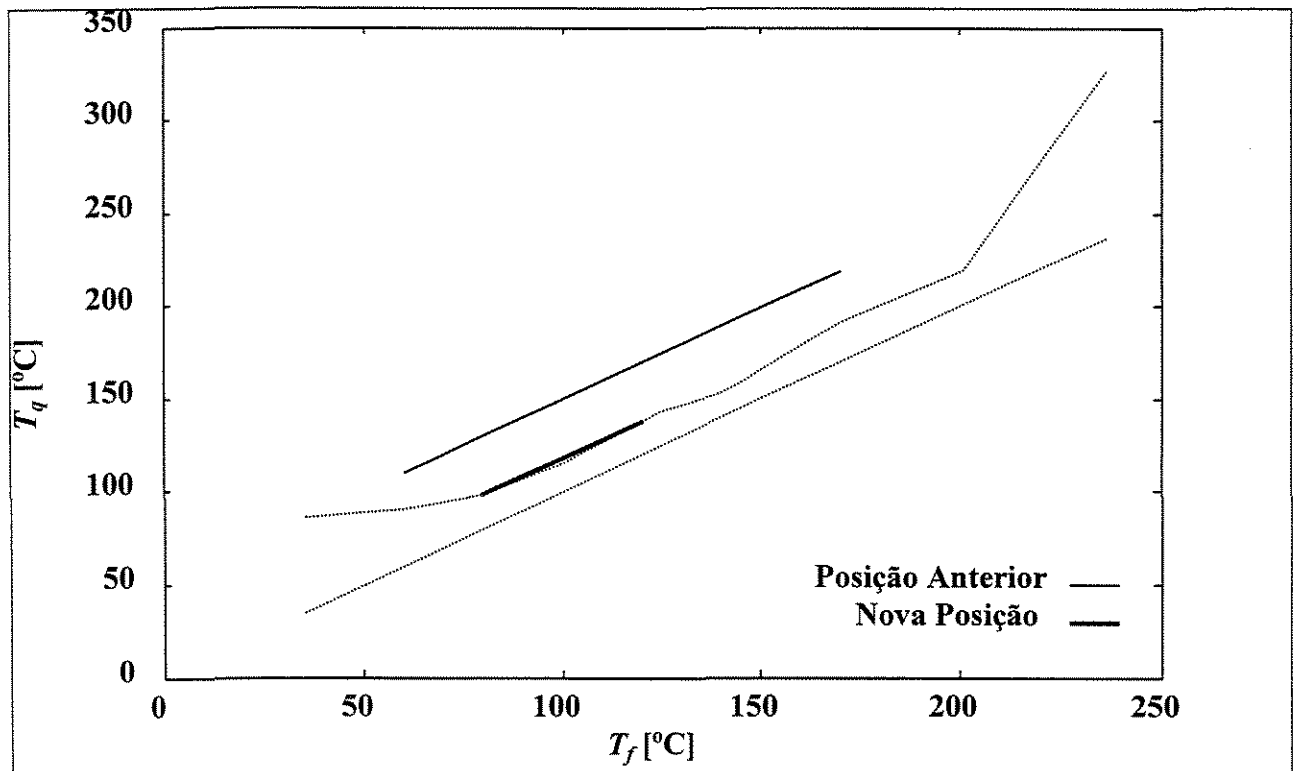
Área: 726,0 m<sup>2</sup>

Corrente fria:

$$T_{ent}: 80,0\text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$T_{sai}: 120,3\text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$W_{C_p}: 60\text{ kW}/^{\circ}\text{C};$$



**Figura 6.7** – Diagrama das forças motrizes para o trocador 4

### Trocador 5

Utilizando o *DFP*, o trocador 5 pode ser considerado bem posicionado em relação ao processo. Uma observação à tabela 6.5 observa-se que a faixa de alocação vertical para o trocador é relativamente extensa. Pode-se então aceitar o posicionamento do trocador e partir para a alocação de nova área na rede. Após a realocação dos trocadores existente a rede toma uma configuração semelhante à mostrada na figura 6.8, com lacunas que devem ser completadas com novos trocadores.

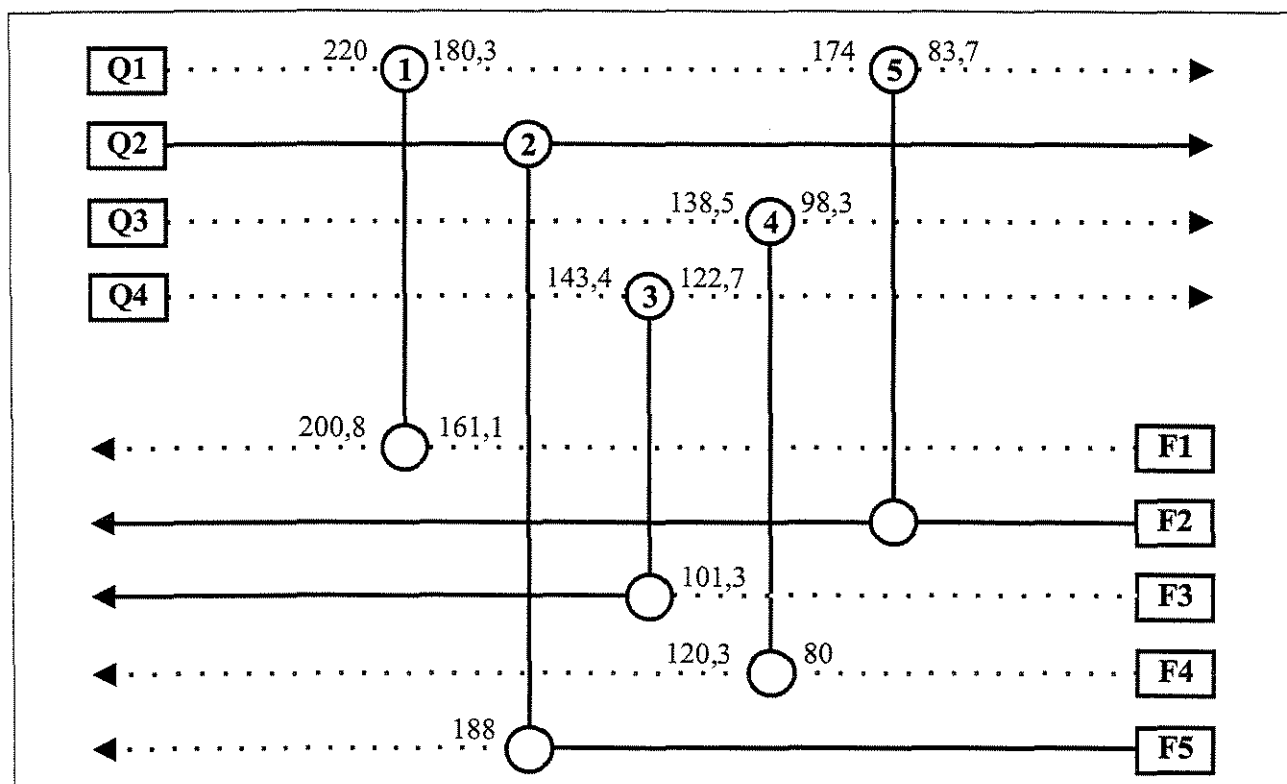


Figura 6.8 – Rede após o reposicionamento dos trocadores

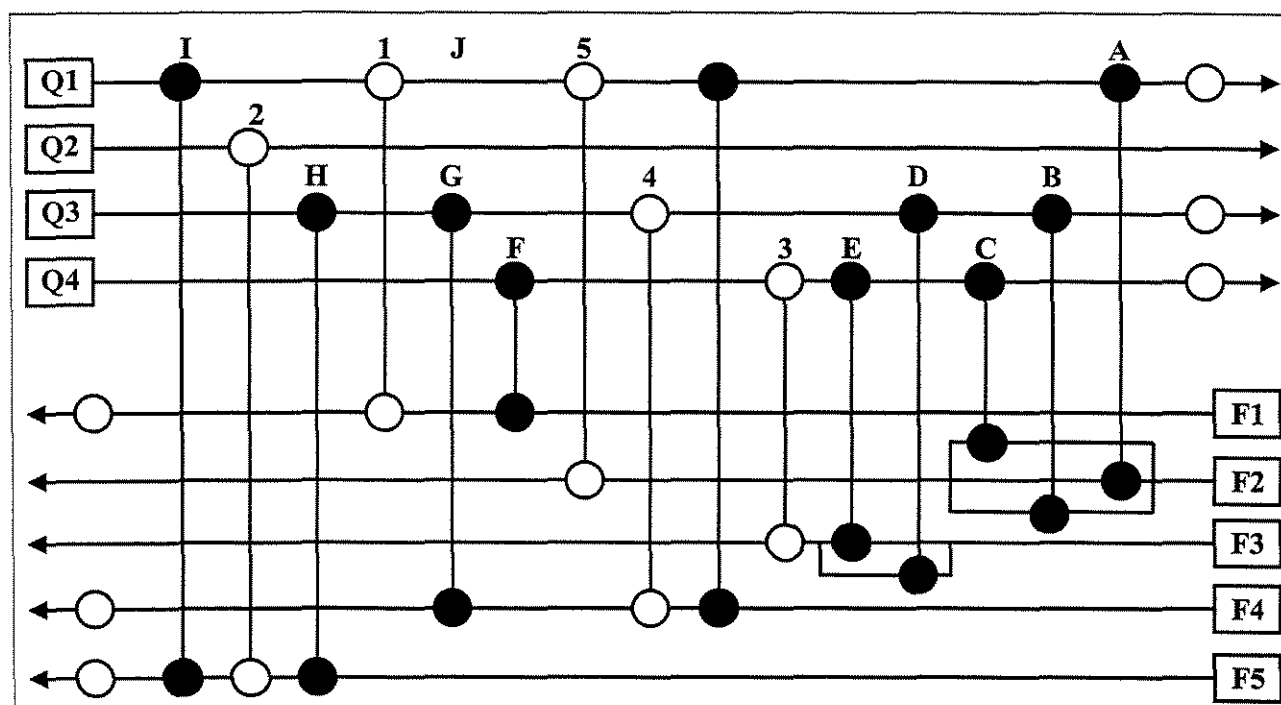
Utilizando a tabela de distribuição de carga térmica, o diagrama das forças motrizes e seguindo os mesmos princípios apresentados no capítulo anterior os trocadores foram reposicionados na rede. No entanto, o novo posicionamento dos trocadores existentes não satisfaz o consumo mínimo de utilidades, estabelecido a partir da análise econômica. Realizando cálculos com as correntes chega-se a um valor máximo para o consumo mínimo de utilidades frias de 19060 kW. O *retrofit* nesta rede é relativamente complicado, uma vez que ela apresenta poucas regiões com grandes forças motrizes, tornando-se muito difícil a alocação de área, principalmente

para valores de  $\Delta T_{min}$  pequenos. Tradicionalmente, o projeto de *retrofit* de redes é conduzido em duas etapas: primeiro o reposicionamento dos trocadores e em seguida a alocação de novos trocadores. Para este nível de recuperação de energia seria mais interessante prosseguir com o *retrofit* simultâneo, ou seja, a alocação da nova área sendo realizada juntamente com o reposicionamento dos trocadores.

Portanto, uma estratégia de *retrofit* simultâneo foi adotada para o projeto da rede, pois esta permite que os trocadores existentes sejam realocados caso seja necessário. Os trocadores 1 a 4 sofreram pequenas alterações em seu posicionamento. Já o trocador 5 teve que ser reposicionado, para que o consumo mínimo fosse satisfeito. Alocando os trocadores novos, guiado pela a tabela 6.6 obteve-se a rede mostrada na figura 6.8.

**Tabela 6.6** - Distribuição de carga térmica (Trocadores novos)

Cruzamento	INT1	INT2	INT3	INT4	INT5	INT6	INT7	INT8	INT9	INT10	
F1Q1									680,9		
F1Q2							1734,6	285,0	192,5		
F1Q4				2500,0	1500,0	586,0					
F2Q3	291,7										
F2Q4	972,2	1262,1			91,7	30,9					
F3Q3			160,1	1250,0							
F3Q4			2958,9								
F4Q1		584,3	294,4	1062,5		320,7	1088,4	360,0			
F4Q4		182,3	49,0		325,0	30,9					
F5Q1										7133,3	
F5Q2							63,8	52,5	54,0		
F5Q3						420,0	1462,5	405,0	1732,5		
F5Q4						752,1					
T <sub>r</sub> [°C]	35.0	60.0	80.0	100.0	125.0	140.0	145.8	164.0	170.0	200.8	236
T <sub>q</sub> [°C]	86.2	91.1	98.3	115.2	143.4	153.0	160.0	184.3	191.1	220.0	327



**Figura 6.9** – Rede modificada após a alocação de novos trocadores

A rede apresentada na figura 6.9 poderia sofrer uma evolução para a redução de trocadores, mas certamente esta evolução levaria a um aumento no consumo mínimo de utilidades. Na tabela 6.7 são apresentados os dados referentes à área de troca térmica dos trocadores e sua carga térmica. Comparando a área estimada de aproximadamente 3900 m<sup>2</sup> com a área alocada nos trocadores pode-se observar grande coerência na metodologia proposta.

**Tabela 6.7** – Dados dos novos trocadores alocados

Trocador	Área [m <sup>2</sup> ]	Carga térmica [kW]
A	34,3	624,0
B	18,0	292,0
C	132,6	2234,0
D	302,1	730,0
E	985,4	5296,0
F	687,6	5368,0
G	860,1	3421,2
H	90,4	2515,8
I	869,9	11578,0
J	214,7	2114,0

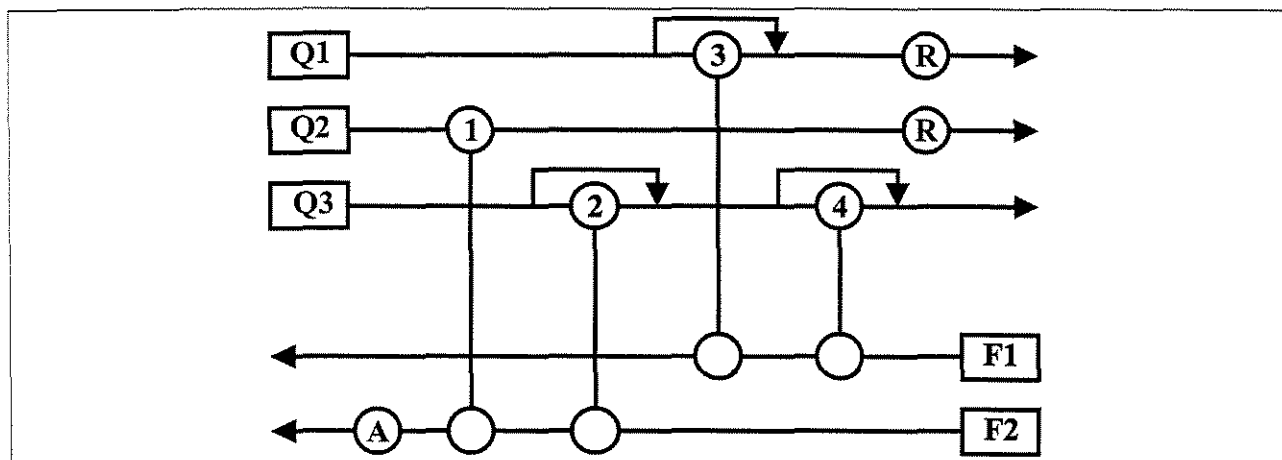
## 6.2. Análise de flexibilidade

Os estudos de *retrofit* aplicados processos flexíveis, isto é, processos que podem operar em mais de uma condição, são pouco abordados na literatura. No entanto, processos flexíveis não são casos raros na indústria. Por exemplo, mudanças nas condições ambientais podem requerer mudanças nas condições operacionais destes processos, que por sua vez provocarão alterações nas condições térmicas da rede de trocadores de calor. Um caso particular de processos flexíveis são os processos multiperíodo, ou seja, quando estes devem operar sob condições pré-estabelecidas de operação durante determinadas épocas do ano. As redes de trocadores ligadas a estes processos também operam sob condições multiperíodo, ou seja, podem mudar as suas condições térmicas e operacionais em função da época do ano.

No estudo de *retrofit* de redes multiperíodo, o objetivo é a modificação de uma rede existente, visando a redução do consumo de energia e a operabilidade de duas ou mais condições térmicas da rede. A consideração de aspectos operacionais no processo como, as limitações de queda de pressão dificultam ainda mais a abordagem do problema. No entanto, estas considerações não podem ser descartadas, pois são de vital importância para uma análise energética que conduza a resultados mais realistas.

A aplicação da metodologia desenvolvida a *retrofit* de redes multiperíodo difere levemente da aplicação desta a outras situações. No caso deste tipo de rede, deve-se adotar uma estratégia conservativa. A disponibilidade de queda de pressão das correntes pode mudar de período para período, pois esta depende da área alocada entre as correntes que está sendo utilizada no período. Uma vez que de um período para outro o requerimento de área muda, esta disponibilidade também mudará. Para a aplicação da metodologia será considerada a situação menos favorável, isto é, a de menor disponibilidade de queda de pressão para a corrente. Isto provocará um aumento na estimativa de área, mas será garantida que a estimativa de área satisfaz a todas as condições em que a rede tem que operar.

Para a aplicação da nova metodologia, um caso presente no trabalho de SHOKOYA (1992) foi utilizado. Este caso apresenta duas condições, que devem ser satisfeitas em períodos diferentes do ano. A rede para esta caso apresenta cinco correntes, três quentes e duas frias, quatro trocadores e três utilidades, como apresentado na figura 6.10. Deve-se ressaltar que o trocador quatro só é utilizado em um dos períodos de operação, assim como nem sempre toda a área dos trocadores é utilizada durante a operação destes em um dado período.



**Figura 6.10** – Rede de trocadores para os dois casos base

Os dados dos trocadores são apresentados na tabela 6.7, com variações entre um caso base e outro. Já os dados dos trocadores são apresentados na tabela 6.8. Os dados de área apresentados nesta tabela, são referentes à maior área entre os dois casos base, para cada trocador. Esta sistemática também foi adotada para garantir um resultado conservativo.

**Tabela 6.7** – Dados das correntes para os dois casos base

Corrente	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$W_{cp}$ [kW/K]	$h$ [kW/m <sup>2</sup> K]
Caso Base 1				
Q1	240,0	80,0	120,0	0,82
Q2	165,0	50,0	55,0	0,61
Q3	180,0	75,0	30,5	0,52
F2	40,0	220,0	98,0	0,71
F3	100,0	280,0	57,5	0,49
Caso Base 2				
Q1	250,0	100,0	98,0	0,82
Q2	195,0	50,0	63,0	0,61
Q3	200,0	75,0	36,0	0,52
F2	85,0	220,0	98,0	0,71
F3	40,0	280,0	57,5	0,49

**Tabela 6.8** – Dados dos trocadores necessários a operação dos casos base

Trocador	Caso Base 1		Caso base 2	
	$A$ [m <sup>2</sup> ]	$Q$ [kW]	$A$ [m <sup>2</sup> ]	$Q$ [kW]
1	296,0	1000,0	296,0	2639,0
2	294,0	2000,0	324,0	4500,0
3	1308,0	16437,0	1159,0	13230,0
4	85,0	1283,0		

A aplicação da metodologia de estimativa requer, além dos dados convencionais, dados das propriedades físicas das correntes e a queda de pressão disponível em cada corrente. Estes dados são apresentados na tabela 6.9. Para ilustrar a aplicação da metodologia os dados de propriedades físicas foram arbitrados, mas são condizentes com dados reais de correntes de processos industriais. Já para a queda de pressão das correntes, será considerado que os valores apresentados na tabela 6.9, representam a mínima queda de pressão disponível para cada corrente,

**Tabela 6.9** - Propriedade Física das correntes

Corrente	$\Delta P$ [kPa]	Propriedades físicas			
		$C_p$ [J/kg.°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\mu \times 10^3$ [kg/m.s]	$k$ [W/m.°C]
Q1	40,00	2600	800	0,5	0,12
Q2	50,00	2600	800	0,5	0,12
Q3	50,00	2600	800	0,5	0,12
F1	50,00	2600	800	0,5	0,12
F2	35,00	2600	800	0,5	0,12

### 6.2.1 Avaliação econômica

O levantamento da curva de retrofit, como foi visto na primeira parte deste capítulo, necessita de equações que relacionem área a capital de investimento e energia a retorno de capital. As equações para este estudo serão as mesmas utilizadas no caso anterior. Com as equações e executando o programa para uma faixa de  $\Delta T_{min}$  pode-se então levantar a curva de



retrofit para os dois casos base, como apresentado na figura 6.11. Nesta figura, foi determinado um investimento máximo de **800000 US** ou um retorno no máximo em **1,5 anos**.

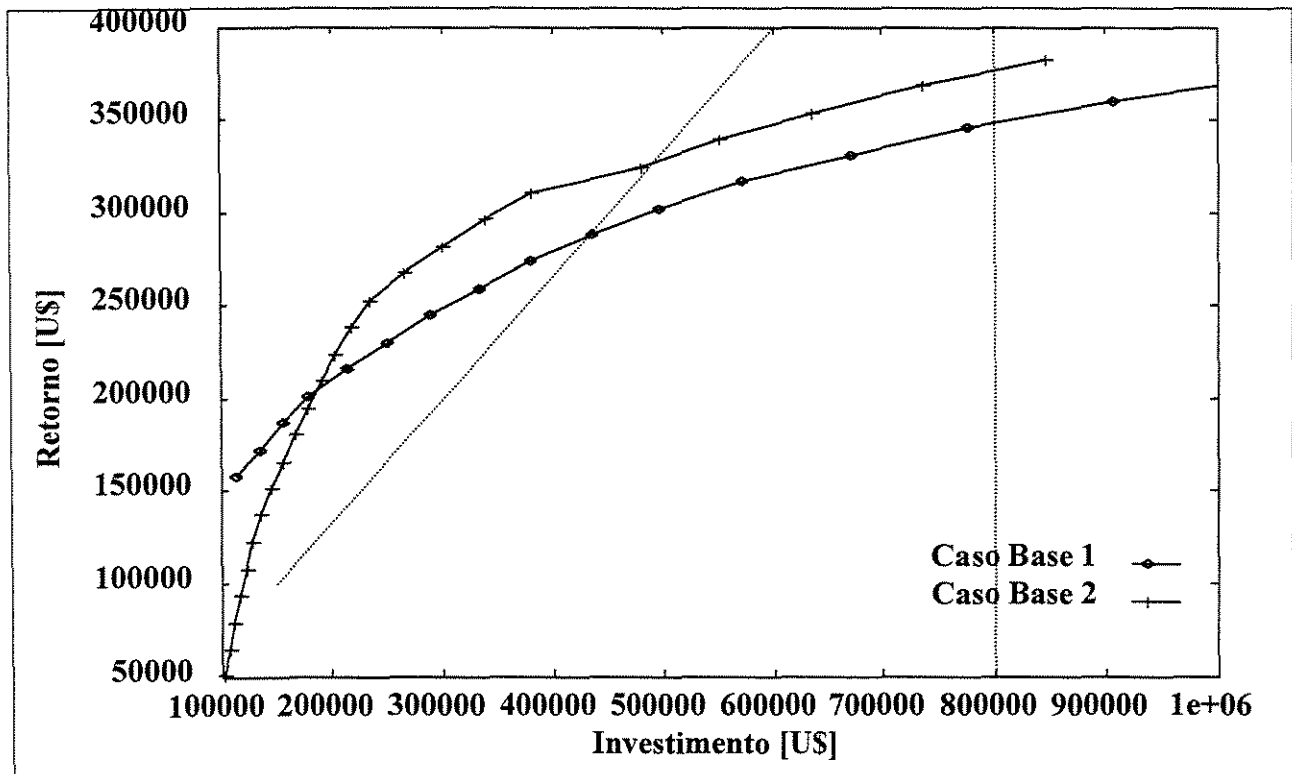


Figura 6.11 – Curva de *retrofit* para os dois casos bases

A figura 6.11 apresenta duas curvas, representativas dos dois períodos de operação da rede. Pode-se observar que a curva de *Payback* cruza as duas curvas em pontos diferentes de investimento e retorno representando relações econômicas diferentes. Por exemplo, neste caso o investimento para o *payback* estabelecido, segundo o caso base 1 seria de aproximadamente US\$ 435000, enquanto segundo o caso base 2 seria de aproximadamente US\$ 485000. Deve-se respeitar as restrições econômicas, ou seja, o investimento limitante seria o que não viola o *payback* máximo em nenhuma das duas condições operacionais, neste caso o investimento do caso base 1. Para este investimento tem-se um  $\Delta T_{min}$  de 16 °C para o caso base 1, correspondendo a um consumo mínimo de utilidades quentes de 4255,5 kW e 4993 kW para as utilidades frias. Já para o caso base 2, o  $\Delta T_{min}$  será de 9 °C levando a um consumo mínimo de utilidades quentes de 3167 kW e 4472 kW para as utilidades frias.

## 6.2.2 Estimativa de área

Estabelecidos os níveis de recuperação de energia para os dois casos base, pode-se então estimar a área vertical adicional para cada caso. Como o  $\Delta T_{min}$  para cada um dos casos foi escolhido em função do investimento realizado, é esperado que a área adicional estimada no primeiro caso seja próxima da estimada no segundo caso, já que o investimento é o mesmo. Na tabela 6.10, são apresentadas as duas matrizes de área adicional, obtidas da execução do programa do modelo desenvolvido. Uma simples conferência de contas mostra que a área estimada para cada um dos casos é da mesma ordem de grandeza.

**Tabela 6.10** – Área vertical adicional para os dois casos base

Caso Base 1			Caso Base 2		
Corrente	F1	F2	Corrente	F1	F2
Q1	834,23	162,00	Q1	478,75	269,66
Q2	592,50	89,93	Q2	471,42	415,86
Q3		100,58	Q3		284,56

Para garantir operabilidade da rede, adotou-se a maior área vertical adicional entre as correntes. Com isto a área estimada para operar nas duas condições sobe para aproximadamente 3800 m<sup>2</sup>. O mesmo foi adotado para os coeficientes que foram utilizados para o cálculo de área para os trocadores. Os coeficientes calculados pelo programa, para os dois casos base, são apresentados na tabela 6.11. Para o cálculo dos trocadores, deve-se utilizar sempre o menor coeficiente da corrente, entre os dois calculados para cada casos base, com a desvantagem de elevar a área do trocador alocado. No entanto, os dois compromissos principais serão satisfeitos: a operabilidade térmica do trocador e a satisfação das restrições operacionais relacionadas às limitações de queda de pressão.

**Tabela 6.11** – Coeficientes convectivos para os dois casos base

Corrente	$h$ [kW/m <sup>2</sup> °C]	
	Caso Base 1	Caso Base 2
Q1	0,41	0,43
Q2	0,52	0,44
Q3	0,56	0,47
F1	1,50	1,63
F2	1,25	1,12

### 6.3. Discussão

Neste capítulo, a metodologia proposta foi utilizada para o *retrofit* de uma rede de trocadores de calor, onde os aspectos econômicos estabeleciam o novo nível de recuperação de energia da rede. Na abordagem tradicional, os aspectos operacionais não são considerados, não sendo possível mensurar a sua importância na análise energética. No presente trabalho observou-se que os aspectos operacionais são de grande importância no *retrofit* de uma rede, pois a disponibilidade de queda de pressão é vital para alocação de área na rede. Neste capítulo, observou-se que quando os aspectos operacionais são considerados, a análise energética continua sendo baseada em uma avaliação econômica, mas esta deve respeitar as limitações operacional presentes na rede, para que a análise energética tenha consistência. Outro ponto abordado no presente trabalho, foi a possibilidade de estudos de análise de flexibilidade com a metodologia desenvolvida. Um caso presente na literatura foi estudado, enfocando a estimativa de área e a predição de custos.

## CONCLUSÃO

No presente trabalho, desenvolveu-se uma nova metodologia de *retrofit* de redes de trocadores de calor. Esta metodologia difere das tradicionais em dois aspectos fundamentais :

- Considera que os coeficientes convectivos de transferência de calor dos novos trocadores não necessariamente serão iguais aos dos trocadores existentes;
- Os novos trocadores alocados deverão satisfazer as limitações de queda de pressão das correntes.

Entretanto, estes aspectos levam a uma formulação mais complexa do problema, exigindo a implementação de técnicas de programação não linear. Para a solução faz-se necessário a utilização de métodos sofisticados de otimização, sendo realizada uma abordagem substancialmente diferente daquela enfocada pelos métodos baseados em análise *pinch* tradicional. A vantagem da nova abordagem é um tratamento mais realista das condições operacionais de uma rede de trocadores de calor industrial.

O método proposto permite a obtenção de estimativas mais rigorosa dos custos de investimento no projeto de *retrofit* para uma dada meta de recuperação de energia, podendo também ser estendido a vários níveis de recuperação de energia, propiciando uma avaliação econômica do processo. Este método, também fornece informações sobre regiões do processo onde novos trocadores devem ser alocados, auxiliando de sobremaneira o projetista, principalmente em sistemas de grande porte, onde o número de correntes do processo é elevado.

Um modelo de programação não linear foi implementado em linguagem GAMS, devido à grande disponibilidade de rotinas de solução de problemas não lineares e legibilidade do código, permitindo programar numa forma similar a descrição matemática do problema. Dentre as rotinas disponíveis no GAMS, o CONOPT se mostrou mais robusto, por ser voltado para problemas altamente não lineares, não havendo problemas de convergência para o modelo formulado.

Os coeficientes convectivos utilizados no cálculo dos novos trocadores são obtidos a partir da queda de pressão disponível nas correntes. Estes coeficientes são calculados através de um método de projeto detalhado dos trocadores. Existem vários métodos de projeto detalhado para o cálculo do coeficiente convectivo, sendo que a diferença entre eles está no modelo de escoamento de utilizado para o cálculo do coeficiente convectivo no lado do casco do trocador.

Dentre estes, o método de Kern é um dos mais simples e mais conhecidos na literatura. Apesar de ser um modelo impreciso na descrição das reais condições de escoamento do fluido no casco, este foi utilizado para a estimativa de custos, uma vez que o objetivo da metodologia foi implementação dos aspectos operacionais da rede de trocadores de calor.

A metodologia desenvolvida, proporciona uma estimativa de custos considerando as limitações operacionais e a distribuição de área na rede. O modelo desenvolvido retorna informações para o projetista das regiões do processo que necessitam de área de troca térmica, além de retornar com os coeficientes que devem ser utilizados para os novos trocadores, calculados pelo método de Kern. Estes coeficientes satisfazem as limitações de queda de pressão das correntes. Uma vez realizada a estimativa, o projeto da rede segue os mesmos princípios da análise *pinch* tradicional, com o reposicionamento dos trocadores existentes e a alocação dos novos trocadores. Nesta fase utiliza-se o diagrama das forças motrizes que permite uma visualização da eficiência do trocador (referente a recuperação de energia) e identificação das modificações necessárias para o projeto de *retrofit*.

Os resultados obtidos neste trabalho, mostram grande concordância entre a estimativa de custos considerando aspectos operacionais e o projeto da rede utilizando os coeficientes convectivos estimados, evidenciando a eficácia da abordagem utilizada. Esta abordagem pode também ser estendida a problemas de síntese e análise de flexibilidade.

Como continuidade do trabalho, visando estender a sua aplicabilidade torna-se desejável estudar as seguintes modificações:

- Utilização de um método mais rigoroso que o de Kern para o cálculo do lado do casco, visando uma estimativa mais precisa da queda de pressão. Entretanto, um método mais preciso necessariamente será mais complexo, podendo tornar a modelagem matemática do problema extremamente difícil. Um estudo de custo/benefício entre o modelo mais simples e um mais complexo seria uma contribuição interessante nesta área.
- Implementação de trocadores com múltiplas passagens nos tubos, de larga utilização industrial. Apesar de aparentemente ser de implementação direta, o cálculo do fator de correção  $F_t$ , necessário para estes trocadores torna o problema altamente não linear, podendo levar a soluções ótimas locais ou situações de não convergência.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CIRIC, A. R. e Floudas, C. A. A comprehensive optimization model of the heat exchanger network retrofit problem, *Heat Recovery System & CHP*, v. 10, n. 4, p 407-422, 1990
- FLOUDAS, C. A., Ciric, A. R. e Grossmann, I. E. Automatic synthesis of optimum heat exchanger network configuration, *AIChE J.* v. 32, n. 2, p276-290, 1986
- KERN, D. Q. *Process heat transfer*, New York: McGraw Hill, 1950
- LINNHOFF, B. e FLOWER, J. R., Synthesis of heat exchanger network. I Systematic generation of energy optimal networks, *AIChE J.*, v 24, n4, p 633-642, 1978.
- LINNHOFF, B. e HINDMASH, The pinch design method for heat exchanger networks, *Chem. Eng. Sci.*, v. 38, n. 5, p. 745-763, 1983
- MORTON, R. J. Individual process improvements in the context of site-wide interactions, *IchemE 11<sup>th</sup> Annual Res. Meeting*, April 1984
- PANJEH-SHAHI, M. H., Manchester/U.K., University of Manchester Institute of Science and Technology, 1991 Tese (Doutorado)
- PAPOULIAS E GROSSMANN, A structural optimization approach in process synthesis – II Heat recovery networks, *Comp. Chem. Eng.*, v. 7, n. 6, p 707-721, 1983
- SHENOY, U. V., *Heat exchanger network synthesis*, Houston: Gulf Publishing Company, 1995, 642 p.
- SHOKOYA, C. G., *Retrofit of heat exchanger network for debottlenecking and energy savings*, Manchester/U.K, University of Manchester Institute of Science and Technology, 1992 Tese (Doutorado)
- TJOE, T. N., *Retrofit of heat exchanger network*, Manchester/U.K, University of Manchester Institute of Science and Technology, 1986 Tese (Doutorado)
- YEE, T. F. e GROSSMANN, I. E., A simultaneous optimization approach for heat exchanger network synthesis, *AIChE Annual Meeting*, San Francisco, Paper n. 136f, 1987.
- YEE, T. F. e GROSSMANN, I. E., A screening optimization approach for retrofit of heat exchanger networks, *Ind. Eng. Chem. Res.*, v 30 p 146-162, 1991